

# **Projeto de uma roda de pás energeticamente eficiente para o cultivo de macroalgas**

*Rui Jorge Meireles Moreira*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Doutor Alexandre Silva Lopes



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Junho 2019



## Resumo

As macroalgas apresentam um elevado potencial na produção de biocombustíveis, produtos farmacêuticos e alimentares, por terem um crescimento rápido e elevada produtividade, mas os custos operacionais têm dificultado a exploração comercial deste organismo. A forma de cultivo mais utilizada é o *raceway pond*, que consiste num reservatório com um separador central, que o divide em dois canais compridos ligados pelas extremidades, e com um escoamento induzido pela rotação de uma roda de pás. Têm sido desenvolvidos vários estudos com o objetivo de reduzir os custos no cultivo de microalgas, otimizando a forma do *raceway pond*, mas o componente propulsor é, frequentemente, ignorado nestas análises, mesmo tendo uma contribuição de 7,5% no custo de operação.

Reconhecendo a necessidade de conhecer melhor este componente, procedeu-se a um estudo numérico do escoamento por ele produzido. Adotou-se a técnica da malha deslizante para simular a rotação da roda de pás no sistema, em oito configurações diferentes, a fim de otimizar o posicionamento da roda, relativamente aos limites inferior e laterais impostos pelo *raceway*, o diâmetro, o número de pás e a sua forma. A análise seguiu alguns indicadores da produtividade do *raceway*, como a velocidade média, a velocidade máxima, os ciclos de exposição fotossintética, as zonas de baixa velocidade e o consumo de energia. Estes foram avaliados em 9 superfícies ao longo do tempo e, uma vez atingido o regime estatisticamente estacionário, foram determinados os valores médios de cada indicador, em cada superfície. Para auxiliar a aplicação em outros casos, utilizaram-se números adimensionais para caraterizar todas as dimensões do sistema em estudo.

Verificou-se que o aumento do espaçamento em relação ao fundo do *raceway* tende a reduzir as velocidades média e máxima, a potência de acionamento da roda de pás, a melhorar a exposição fotossintética e aumentar as zonas mortas. A velocidade média e a potência de acionamento aumentam com a largura das pás, enquanto que a velocidade máxima, as zonas de baixa velocidade e dos ciclos fotossintéticos diminuem. Um diâmetro mais elevado produz um aumento das velocidades média e máxima, da potência de acionamento, a redução das zonas de baixa velocidade e dos ciclos fotossintéticos. A eficiência na conversão da rotação das pás num escoamento aumenta com o diâmetro. A redução do número de pás produz menores velocidades média e máxima, as zonas de baixa velocidade e potência de acionamento diminuem, e os ciclos de exposição fotossintética aumentam.

A configuração otimizada indicou um potencial de redução do consumo de energia de uma instalação em 43% e a diminuição das zonas de baixa velocidade, mantendo-se o ciclo de exposição fotossintética.



## Design of energy-efficient paddlewheel for macro-algae cultivation

### Abstract

Macroalgae present a high potential in the production of biofuels and in the pharmaceutical and food industries, because of their fast growth rate and high productivity, however high operational costs are still limiting commercial yield. The most common cultivation method is the raceway pond, a tank with a centre divider making two channels connected by its ends, and a rotating paddlewheel to generate water flow. Multiple studies on cost reduction for microalgae cultivation have been conducted, frequently by optimizing the shape of the raceways, but the paddlewheel is often ignored, despite its contribution to 7.5% of the operational costs.

Acknowledging the need to better understand this component, a numerical study of the generated flow was conducted. Using the sliding mesh technique to simulate the rotation of the paddlewheel, and eight different configurations, its position to the raceway's lower and side walls, diameter, number and shape of the paddles were optimized. The analysis followed some production indicators, such as the average and maximum velocities, photosynthetic exposure, low speed areas and energy consumption. These indicators were evaluated and time-averaged in 9 surfaces, when steady state was attained. To extend the applicability in other cases, all dimensions of the system were adimensionalized.

It was found that increasing the spacing to the bottom of the raceway lowers average and maximum velocities and power consumption, while photosynthetic exposure and low speed areas are increased. Average velocity and energy consumption grow with paddle width, whereas maximum velocity, low speed areas and light exposure lessen. Higher diameters contribute to the increase of the velocities and power consumption; low speed areas and photosynthetic cycles are reduced. The conversion of paddle rotation into a flow is more efficient with bigger diameters. Lowering the number of paddles reduces average and maximum velocities, low speed areas and energy consumption; photosynthetic exposure is increased.

The optimized configuration showed the potential of reducing the power consumption of a facility by 43%, while low speed areas have decreased, and light cycles were maintained.



## Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, o Doutor Alexandre Silva Lopes, na FEUP, e ao Eng. Adriano Lima, no INEGI, pela sua disponibilidade, acessibilidade e partilha de conhecimento. Aos colaboradores do INEGI, pelo seu acolhimento e conselhos.

Recordo também os amigos que fiz ao longo do percurso académico, pelo seu encorajamento nas situações mais difíceis, pelos momentos de diversão e por me ajudarem a ser uma pessoa mais completa.

Agradeço o financiamento ao projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 – *SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries*, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).





## Índice de Conteúdos

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento do projeto e motivação .....	1
1.2	Objetivos do projeto .....	2
1.3	Estado da arte .....	2
1.3.1	Velocidade e turbulência do escoamento .....	3
1.3.2	Diâmetro da roda e posicionamento .....	4
1.3.3	Forma das pás .....	4
1.3.4	Modelação computacional .....	5
1.4	Método seguido no projeto .....	6
1.5	Estrutura da dissertação .....	7
<b>2</b>	<b>Modelos numéricos .....</b>	<b>9</b>
2.1	Turbulência .....	9
2.2	Condições de fronteira .....	10
2.3	Modelo do <i>raceway pond</i> .....	11
2.4	Modelo do canal de ensaio .....	13
<b>3</b>	<b>Análise de resultados .....</b>	<b>15</b>
3.1	Validação do modelo numérico .....	15
3.2	Otimização da roda de pás .....	18
3.2.1	Referência .....	22
3.2.2	Geo-1 .....	23
3.2.3	Geo-2 .....	24
3.2.4	Geo-3 .....	24
3.2.5	Geo-4 .....	26
3.2.6	Geo-5 .....	27
3.2.7	Geo-6 .....	27
3.2.8	Geo-7 .....	29
3.2.9	Forma das pás .....	30
3.3	Comparação entre malhas .....	31
3.4	Sumário das configurações .....	32
<b>4</b>	<b>Conclusões e perspectivas de trabalho futuro .....</b>	<b>35</b>
4.1	Conclusões .....	35
4.2	Trabalhos futuros .....	36
	<b>Referências .....</b>	<b>37</b>
<b>Anexo A</b>	<b>Gráficos de resultados .....</b>	<b>39</b>
<b>Anexo B</b>	<b>Gráficos comparativos entre malhas .....</b>	<b>47</b>



## Nomenclatura

### Siglas

<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<b>DNS</b>	<i>Direct Numerical Simulation</i>
<b>GENIALG</b>	<i>Genetic diversity exploitation for innovative macro-algal biorefinery</i>
<b>INEGI</b>	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
<b>LES</b>	<i>Large Eddy Simulation</i>
<b>RANS</b>	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
<b>TECMAR</b>	Tecnologias para o mar (Unidade do INEGI)

### Variáveis latinas

$A_s$	Área da secção [m <sup>2</sup> ]
$B$	Binário na roda de pás [Nm]
$d$	Distância livre entre a ponta da pá da roda de pás e o fundo do <i>raceway pond</i> [m]
$D$	Diâmetro da roda de pás [m]
$D_h$	Diâmetro hidráulico [m]
$F_d$	Força de arrasto [N]
$F_t$	Força de impulsão [N]
$g$	Aceleração gravítica [m/s <sup>2</sup> ]
$H$	Altura de água no <i>raceway pond</i> [m]
$L$	Largura do <i>raceway pond</i> [m]
$l_c$	Largura do canal do <i>raceway pond</i> [m]
$l_p$	Largura das pás da roda [m]
$n$	Velocidade de rotação da roda de pás [r.p.m]
$\Delta p$	Diferença de pressão [Pa]
$P$	Potência de acionamento da roda de pás [W/m <sup>3</sup> ]
$P_e$	Potência estimada para acionar a roda de pás [W/m <sup>3</sup> ]
$P_m$	Perímetro molhado [m]
$Q$	Caudal de água num plano [m <sup>3</sup> /s]
$u, v$	Componentes do vetor velocidade num volume finito, na direção horizontal e vertical [m/s]
$u_*$	Velocidade de fricção [m/s]
$V$	Magnitude do vetor velocidade num volume finito [m/s]
$\bar{V}$	Média espacial de $V$ [m/s]
$\bar{\bar{V}}$	Média temporal de $\bar{V}$ [m/s]
$V_e$	Velocidade na secção para estimativa da potência [m/s]
$\bar{V}_{máx}$	Média temporal da velocidade máxima num plano [m/s]
$V_s$	Velocidade da água na secção [m/s]
$\overline{v/V}$	Média espacial da razão $v/V$ calculada em cada volume finito [-]
$\overline{\overline{v/V}}$	Média temporal da razão $\overline{v/V}$ [-]
$W$	Comprimento do <i>raceway pond</i> [m]
$y$	Distância à parede [m]

## Grupos adimensionais

$C_D$	Coeficiente de arrasto [-]
$CFL$	Número de Courant-Friedrichs-Lewy [-]
$mv$	Mistura vertical [-]
$rd_f$	Razão de distância ao fundo [-]
$rd_l$	Razão de distância lateral [-]
$rd_p$	Razão entre o diâmetro e a profundidade [-]
$Re$	Número de Reynolds [-]
$y^+$	Distância adimensional do primeiro nó da malha à parede [-]

## Variáveis gregas

$\epsilon$	Energia cinética de turbulência [ $m^2/s^3$ ]
$\eta$	Escala de comprimento de Kolmogorov [m]
$\mu$	Viscosidade dinâmica [Pa s]
$\rho$	Massa volúmica [ $kg/m^3$ ]
$\nu$	Viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]
$\tau$	Escala de tempo de Kolmogorov [s]
$\tau_w$	Tensão de corte na parede [Pa]

## 1 Introdução

### 1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O projeto GENIALG tem o objetivo de impulsionar a produção de macroalgas na Europa e envolve várias empresas europeias. À unidade de investigação TECMAR, do INEGI, foi confiada a tarefa de desenhar um *raceway pond* que maximize a produtividade e minimize o consumo de energia, a implementar na localidade de Ílhavo, Aveiro, nas instalações da empresa ALGAplus (Figura 1). Para ajudar a reduzir os custos de produção, os tanques para as macroalgas são adjacentes a aquaculturas de peixes, aproveitando-se, assim, os nutrientes das renovações de água.

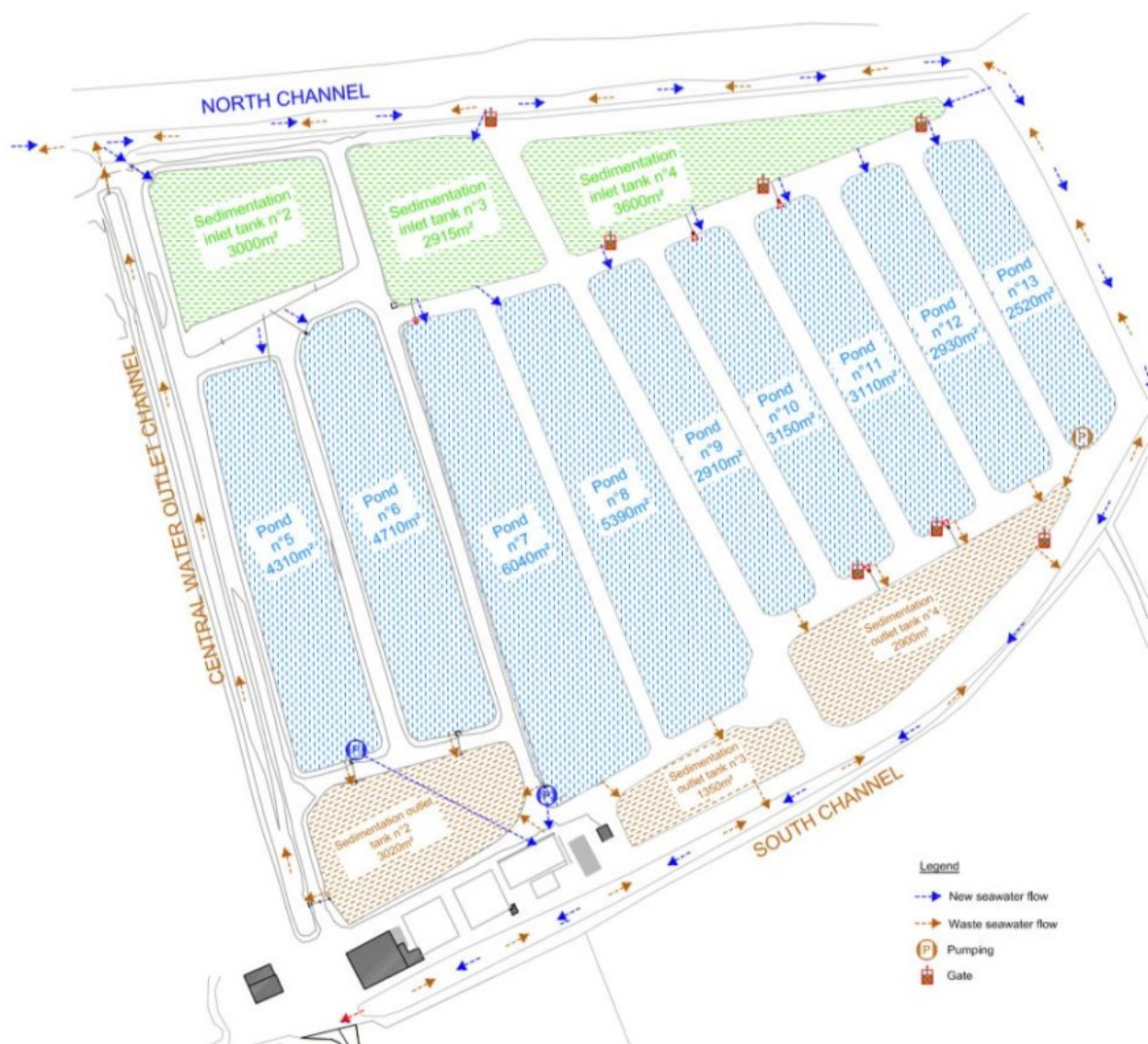


Figura 1 – Instalações da ALGAplus (INEGI 2019).

Apesar de as algas apresentarem um elevado potencial para a produção de combustíveis renováveis, de produtos farmacêuticos, cosméticos e alimentares, os custos de cultivo têm sido um obstáculo à sustentabilidade e ao crescimento deste setor (GENIALG 2019; Sudhakar et al. 2018). As macroalgas possibilitam o controlo do aquecimento global, por apresentarem uma eficiência fotossintética muito superior à das plantas e pelo facto de os oceanos dissolverem 60 vezes mais  $\text{CO}_2$  do que a atmosfera. Estas têm, também, características importantes para a produção de biocombustíveis, como o crescimento rápido, a elevada produtividade e um teor elevado de polissacarídeos (Sudhakar et al. 2018). No caso da empresa ALGAplus, o cultivo das macroalgas terá, maioritariamente, o fim alimentar.

A literatura apresenta algumas soluções de dimensionamento dos *raceways* para microalgas, com o objetivo de minimizar os custos de operação. O mecanismo que movimenta a água e evita a deposição das algas é, geralmente, uma roda de pás (Figura 2). Esta apresenta uma contribuição de 7,5% no custo de operação (Rogers et al. 2014), mas costuma ser ignorada na otimização do processo produtivo.



Figura 2 – *Raceway ponds* acionados por rodas de pás em África do Sul. Cortesia de Viking Aquaculture.

A condicionante ambiental em construir os *raceways* em terra, em vez do habitual betão, obrigou à utilização de paredes inclinadas, alterando as características típicas do escoamento. As inovações exploradas pelo INEGI foram a utilização de um separador central modular, para otimizar experimentalmente a sua forma, a renovação das águas com as marés, para reduzir os custos de bombagem, e a otimização da roda de pás, que é focada nesta dissertação, com o estudo de diferentes configurações.

## 1.2 Objetivos do projeto

O objetivo deste projeto é a otimização dos parâmetros característicos de uma roda de pás, ou seja, o posicionamento em relação às paredes inferiores e laterais, o diâmetro e o número de pás, ao nível da produtividade do *raceway pond* e do consumo de energia associado ao seu acionamento, recorrendo a uma análise numérica num *software* de CFD.

## 1.3 Estado da arte

As macroalgas podem ser obtidas de três formas: diretamente do mar, apanhadas mortas na costa ou por cultivo de espécies selecionadas. O cultivo pode ser realizado diretamente no mar, em parques eólicos *offshore* ou simplesmente ancoradas ao leito, ou na costa, em tanques alimentados com água do mar ou combinados com aquaculturas, proporcionando um aumento da produtividade em relação ao crescimento natural (Sudhakar et al. 2018). O cultivo de algas

é efetuado em fotobioreatores, que podem ser dos tipos aberto ou fechado. Os fechados são de construção, operação e manutenção dispendiosa, mas permitem uma elevada produtividade (Huang et al. 2015). Os abertos são os mais comuns, dentro dos quais a configuração *raceway pond*, que contabiliza 95% da produção mundial de algas (Kumar et al. 2015). Este consiste num tanque comprido com um separador central, que o divide em dois canais unidos nas extremidades, obtendo-se a forma de uma pista oval, onde circulam algas dispersas em água, por meio da rotação de uma roda de pás. Tipicamente, a profundidade da água está compreendida entre 15 e 40 cm (Hreiz et al. 2014), no caso de microalgas, ou 60 cm para macroalgas, para que haja uma penetração adequada da radiação solar, que é essencial para a fotossíntese. Segundo Kumar et al. (2015), há uma divergência entre autores no que toca à melhor profundidade para os *raceways*, afirmando alguns que uma profundidade menor é preferível, por terem uma melhor produção por unidade de energia consumida, enquanto outros declaram que uma profundidade elevada é preferível, por melhorar a eficiência fotossintética e a produtividade por unidade de área de superfície. Assim, a escolha da profundidade deverá resultar de um estudo económico entre o preço do terreno e da energia elétrica, tendo em conta a incidência de radiação solar no local de exploração e a atenuação inerente à presença das algas.

Os estudos existentes sobre *raceway ponds* e rodas de pás são, maioritariamente, para o cultivo de microalgas, e o foco principal é na otimização do *raceway pond*. Por outro lado, este trabalho é para aplicação em macroalgas e foca-se na otimização da roda. Assim, a informação sobre o dimensionamento deste componente é muito limitada.

### 1.3.1 Velocidade e turbulência do escoamento

A circulação da água num *raceway pond* é fundamental no cultivo de algas (Li et al. 2013). Geralmente, a água circula a velocidades entre os 0,15 e os 0,4 m/s por meio da rotação de uma roda de pás (Hreiz et al. 2014). A velocidade mínima recomendada para evitar a deposição das algas é de 0,1 m/s, denominando-se por “zonas mortas” as regiões com velocidade igual ou inferior (Sompech, Chisti, e Srinophakun 2012). O consumo de energia é uma função cúbica da velocidade induzida pela rotação da roda de pás (Hadiyanto et al. 2013).

A mistura é um dos principais fatores produtivos num *raceway pond*, pois assegura que as algas são mantidas em suspensão, melhora a distribuição de nutrientes e a difusão para a atmosfera do oxigénio gerado na fotossíntese (Kumar et al. 2015). A mistura pode ser quantificada pelo número de Reynolds, uma medida da turbulência no escoamento (Equação 1.1).

$$Re = \frac{\rho V_s D_h}{\mu}, \quad (1.1)$$

onde  $\rho$  e  $\mu$  representam, respetivamente, a massa volúmica e a viscosidade dinâmica, e  $V_s$  é a velocidade média da água na secção. Como se trata de um canal aberto, utiliza-se a definição de diâmetro hidráulico ( $D_h$ ), Equação 1.2, baseado na razão entre a área da secção ( $A_s$ ) e o perímetro molhado ( $P_m$ ) (White 1974).

$$D_h = \frac{4A_s}{P_m} \quad (1.2)$$

No entanto, segundo Prussi et al. (2013), a utilização do número de Reynolds não é adequada para definir a mistura vertical, que é uma medida da frequência com que as algas são trazidas para a superfície. A roda de pás tem a função de manter as algas em suspensão, mas também as deve transportar do fundo para a superfície, para realizarem a fotossíntese. Este movimento ascendente deve-se à componente vertical da velocidade, que não é garantida na definição do número de Reynolds. A mistura vertical pode ser baixa, mesmo com um  $Re$

elevado, se a componente vertical da velocidade apresentar uma pequena contribuição no módulo do vetor. Ainda assim, o número de Reynolds deve ser elevado, para minimizar as zonas mortas no tanque, mas não excessivo, de modo a controlar a dissipação inerente à turbulência. Para medir a mistura vertical ( $mv$ ) numa dada secção do escoamento, Prussi et al. (2013) sugeriram a utilização da Equação 1.3, correspondente à razão entre a componente vertical do vetor velocidade ( $v$ ) e a norma da velocidade nessa secção ( $V_s$ ).

$$mv = \frac{v}{V_s} \quad (1.3)$$

A utilização de defletores nas curvas do *raceway pond* é uma das soluções mais eficazes para minimizar a percentagem de zonas mortas, mas afeta negativamente a mistura vertical, uma vez que é sobretudo nas curvas que se formam os vórtices responsáveis pelos movimentos ascendente e descendente das algas. Apesar desta solução reduzir significativamente o consumo de energia, afeta a produtividade (Prussi et al. 2014).

### 1.3.2 Diâmetro da roda e posicionamento

Segundo Li et al. (2013), as rodas de pás com maior diâmetro são mais eficientes, por apresentarem menos refluxo, ou seja, perdem menos água pela região central. Pirasaci et al. (2017) obtiveram uma diminuição da percentagem de zonas mortas, com um aumento do diâmetro da roda, mas à custa de um acréscimo significativo na potência de acionamento. Este estudo foi realizado para dois posicionamentos da roda no tanque: antes da curva e no centro no canal, verificando-se que era vantajosa a colocação próxima da curva do ponto de vista da percentagem de zonas mortas, uma vez que o consumo de energia era idêntico.

### 1.3.3 Forma das pás

Li et al. (2013) estudaram experimentalmente, num tanque pequeno, rodas com quatro pás, para diferentes velocidades de rotação e alturas de água. Também estudaram a forma das pás: planas, onduladas e curvadas. As suas conclusões foram:

- Para atingir uma determinada velocidade de escoamento, deve-se diminuir a velocidade de rotação à medida que a profundidade de água aumenta;
- A velocidade do escoamento aumenta com a profundidade, mas começa a diminuir quando a altura da água é superior à das pás. As causas apontadas para esta diminuição foram o agravamento das perdas por turbulência e a impossibilidade de a área varrida pelas pás continuar a aumentar, depois de estas estarem totalmente imersas;
- A potência necessária para acionar a roda aumenta com a velocidade de rotação e com a altura de água. No entanto, colocando a potência em função da velocidade, verifica-se que a potência não é função do cubo da velocidade, conforme relatado por Hadiyanto et al. (2013) e atestado em resultados de outros autores;
- As rodas com pás planas têm uma eficiência (razão entre a potência hidráulica e a potência ao veio) mais elevada, sendo a melhor configuração a converter a rotação das pás num escoamento.

Hreiz et al. (2014) criaram uma roda dividida em três secções, cada uma com 5 pás e com um desfasamento de  $22,5^\circ$  entre secções (Figura 3), e compararam-na à configuração sem o desfasamento. A velocidade média para as duas configurações era idêntica e aumentou linearmente com a velocidade de rotação, indicando que a roda se comporta como uma bomba volumétrica a baixas velocidades de rotação. Este comportamento deixou de ser notado ao aumentar a distância entre a pá e o fundo do *raceway*, devido ao maior volume de fluido que circula por efeito da sua inércia, em vez de ser empurrado pelas pás. Os autores concluíram que



a roda com as pás alinhadas tinha um desempenho melhor na mistura, especialmente para velocidades de rotação elevadas, mas à custa de uma potência ligeiramente superior. Comparando o binário nas duas configurações, verifica-se que a amplitude é superior com as pás alinhadas (Figura 4), e esta será a razão para a maior pulsação no escoamento e, consequentemente, da melhor mistura. Por outro lado, as pás desalinhadas produzem menos vibrações no sistema de acionamento, favorecendo a sua longevidade.

A influência do número de pás no desempenho da roda ainda não foi estudada.

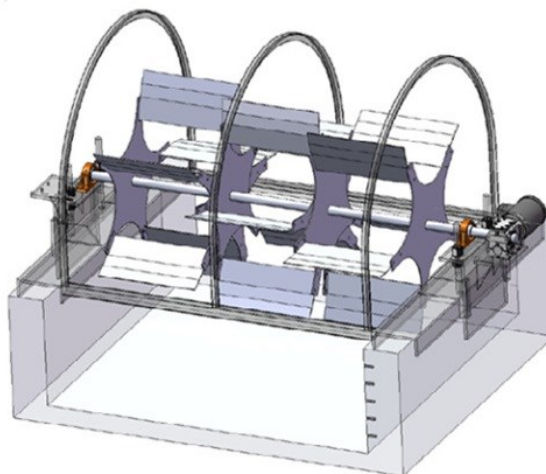


Figura 3 – Desenho esquemático das pás desfasadas. Adaptado de Hreiz et al. (2014).

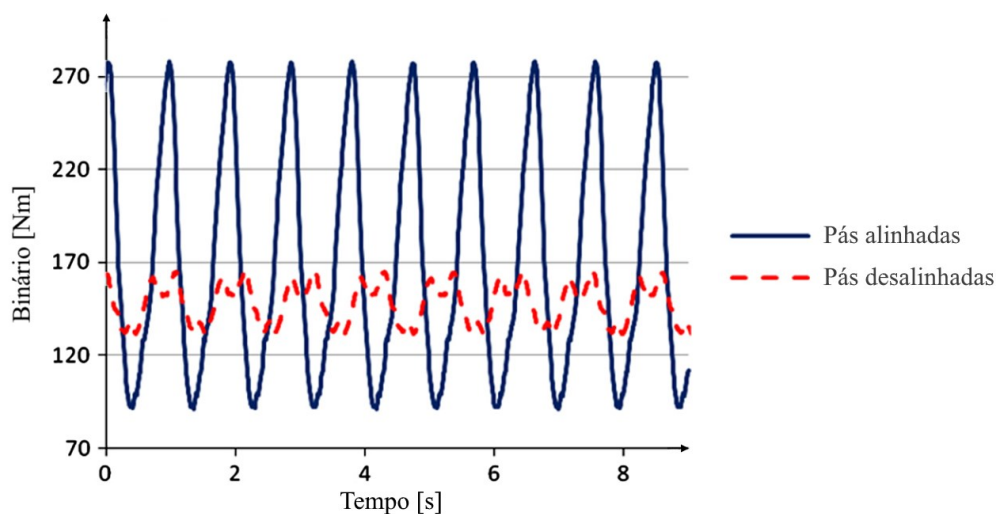


Figura 4 – Variação do binário na roda de pás, atingido o regime permanente, nos casos de pás alinhadas e desfasadas em 22,5°. Adaptado de Hreiz et al. (2014).

#### 1.3.4 Modelação computacional

Os estudos neste tema recorrem, geralmente, a pacotes de *software* CFD, procedendo-se à validação dos modelos desenvolvidos com dados experimentais.

Prussi et al. (2014) adotaram uma malha não estruturada com refinamento na proximidade das paredes, assim como Sompech, Chisti, e Srinophakun (2012), que usaram uma malha composta por elementos tetraédricos. Huang et al. (2015) preferiram usar elementos hexaédricos. Já Prussi et al. (2013) optaram por uma malha híbrida, com uma zona estruturada na proximidade da parede e uma zona não-estruturada no restante domínio. A utilização de uma malha estruturada tem a vantagem de ter um cálculo mais rápido, e, geralmente, uma solução mais precisa em geometrias simples do que uma não-estruturada. Para geometrias e

escoamentos complexos, uma malha não-estruturada é gerada mais rapidamente e tende para soluções mais precisas, por gozar de maior adaptabilidade à forma da geometria (MIT 2005).

Relativamente ao número de elementos, existe uma alteração de 3,9% no valor das velocidades entre uma malha com 380 mil e 600 mil elementos (Huang et al. 2015), e uma variação de 7% na determinação do caudal entre uma malha com um milhão de elementos e outra com 2,6 milhões (Liffman et al. 2013). No entanto, as dimensões do *raceway* são muito diferentes e, por isso, os dois casos não são comparáveis. O número médio de elementos por metro cúbico de água no primeiro caso é de 181 415 elementos/m<sup>3</sup> e no segundo é 12 569 elementos/m<sup>3</sup>.

A roda de pás pode ser modelada como uma zona móvel, através de uma malha deslizante, ou como uma fonte de quantidade de movimento (Amini et al. 2016). Apenas dois autores optaram pela técnica da malha deslizante: Hreiz et al. (2014) e Huang et al. (2015). Amini et al. (2016) compararam os campos de velocidades produzidos pelas duas técnicas com medições experimentais, obtendo um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9947 para a malha deslizante e de 0,9838 para a fonte de quantidade de movimento, concluindo que, quando o objetivo é estudar apenas o escoamento no *raceway pond*, não se justifica o maior custo computacional da malha deslizante. Hreiz et al. (2014) calcularam a potência de acionamento da roda usando o método da malha deslizante, obtendo uma diferença máxima de 6% em relação aos valores experimentais; no entanto, a forma de cálculo da potência não foi apresentada.

O modelo de turbulência *k-ε* Standard é o mais utilizado (Sompech, Chisti, e Srinophakun 2012; Pirasaci et al. 2017; Huang et al. 2015), mas a formulação Realizável também é usada (Hreiz et al. 2014), assim como a variante RNG (Amini et al. 2016). Huang et al. (2015) recorreram a funções de parede escaláveis (*scalable wall function*) para o tratamento na proximidade da parede. Este tipo de funções está preparado para malhas mais refinadas do que as standard, evitando a deterioração a solução na proximidade da parede (ANSYS Inc. 2019).

A interface entre a superfície da água e o ar requer a utilização de modelos multifásicos. O mais habitual é o *Volume of Fluid* (Prussi et al. 2014; Hreiz et al. 2014), que permite modelar os dois fluidos num único conjunto de equações, através do registo das frações volúmicas em todo o domínio (ANSYS Inc. 2019). Amini et al. (2016) utilizaram o modelo Euleriano, que permite adicionar as algas à simulação, tratando-as como partículas em suspensão na água. A principal vantagem do método *Volume of Fluid* é a possibilidade de incluir os efeitos do vento, que afetam significativamente a correlação com os dados experimentais (Hreiz et al. 2014).

## 1.4 Método seguido no projeto

O projeto partiu do desenvolvimento de um modelo computacional robusto, sensível a pequenas alterações da geometria da roda de pás, de modo a comparar os indicadores relevantes para a produtividade e determinar a potência requerida por cada configuração. De seguida, validou-se indiretamente o modelo computacional, por comparação com resultados numéricos obtidos por outros autores. Os contornos das variáveis evoluíram para a solução pretendida, pelo que se considerou que o modelo estava bem definido, apesar de ao fim de quatro meses o regime permanente ainda não ter sido atingido. Para acelerar a obtenção dos resultados, criou-se um segundo modelo, que consiste num canal comprido e aberto nas extremidades, com a vantagem adicional de eliminar a influência da forma do *raceway pond*, que foi estudada em paralelo com este trabalho.

Para avaliar o desempenho de cada configuração, dividiu-se o domínio em três planos horizontais e sete verticais. Em cada plano foram avaliadas as velocidades média e máxima do escoamento, a mistura vertical e a percentagem de zonas mortas. Os parâmetros analisados

foram a distância entre a ponta das pás e o fundo do *raceway*, a distância entre as pás e a parede lateral do *raceway*, o diâmetro e o número de pás da roda. Em vez de realizar uma otimização multivariável, procedeu-se a um estudo paramétrico, avaliando a influência individual de cada parâmetro. Para realçar a melhoria da roda de pás, a melhor alternativa de um dado parâmetro foi mantida nas simulações com os parâmetros seguintes. Desta forma, simplifica-se o processo, mas as não-linearidades podem afetar a fidelidade do estudo.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é composta por quatro capítulos, entre os quais esta Introdução. No Capítulo 2 são apresentados os modelos computacionais desenvolvidos para estudar as geometrias da roda de pás, indicando as configurações necessárias para realizar as simulações num *software* de CFD. No Capítulo 3 são validados os modelos numéricos, são expostos os parâmetros em estudo, o procedimento de otimização da roda e as diferentes geometrias estudadas, salientando as diferenças entre elas; são apresentados os números adimensionais que permitem a aplicação em outros casos e os resultados mais importantes. No último capítulo resumem-se os resultados e são apresentadas as principais conclusões para o dimensionamento de uma roda de pás, e propõem-se matérias para investigação futura.



## 2 Modelos numéricos

Os problemas de Mecânica dos Fluidos podem ser solucionados por uma análise teórica, experimental ou numérica. Ao contrário da análise teórica, que está frequentemente limitada a problemas simples, a experimental soluciona casos de elevada complexidade e permite o desenvolvimento de equações governativas e de relações experimentais, mas tem, muitas vezes, um grande custo monetário. A abordagem numérica baseia-se na combinação de modelos teóricos e de correlações empíricas, permitindo resolver problemas de elevada complexidade e obter dados em qualquer local do sistema, muitas vezes sem um custo adicional, poupando-se tempo e equipamentos, comparativamente à análise experimental. No entanto, a qualidade das soluções numéricas é muito sensível aos modelos utilizados, e é aconselhável fazer uma validação teórica ou experimental, principalmente quando se trata de casos que não estão bem documentados. Em contrapartida, estando validado o modelo, há possibilidade de estudar pequenas variações no sistema, sem necessidade de nova validação ou de uma nova campanha de medições experimentais.

Atendendo aos objetivos deste trabalho, realizou-se uma análise numérica. Nos subcapítulos seguintes apresentam-se algumas considerações fundamentais neste tipo de abordagem.

### 2.1 Turbulência

A forma computacionalmente menos exigente para simular escoamentos turbulentos consiste nos modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), entre eles o Spalart-Allmaras, o  $k-\epsilon$ , o  $k-\omega$ , o de transição laminar-turbulento e o modelo das tensões de Reynolds. O modelo de uma equação de Spalart-Allmaras é adequado a escoamentos em que a camada limite está sujeita a gradientes de pressão adversos, sendo muito utilizado em turbomáquinas e aplicações aeronáuticas e aeroespaciais; a sua utilização para outros casos é desaconselhada. O modelo  $k-\epsilon$  resolve duas equações de transporte e modela as tensões de Reynolds com a definição de uma viscosidade turbulenta. É um modelo muito utilizado, por ser robusto e de cálculo simples, mas é pouco sensível a gradientes de pressão adversos e à separação da camada limite. O  $k-\omega$ , por outro lado, é melhor a prever a separação da camada limite e gradientes de pressão adversos, mas a solução é muito sensível aos valores de  $k$  e  $\omega$  fora da camada limite. O modelo de transição laminar-turbulento só é aplicável a escoamentos entre paredes, requer a especificação do nível de turbulência na secção de entrada e não é compatível com escoamentos multifásicos. O modelo das tensões de Reynolds é de cálculo mais demorado, por envolver o cálculo de seis equações e ter uma convergência mais difícil, mas apresenta ótimos resultados em escoamentos com grande rotação e com vórtices (ANSYS Inc. 2019).

O modelo de turbulência  $k-\epsilon$  é o mais utilizado por outros autores (Sompech, Chisti, e Srinophakun 2012; Pirasaci et al. 2017; Huang et al. 2015), atendendo à sua versatilidade e à insignificância dos seus defeitos no caso em estudo, mas não há concordância na formulação mais adequada: standard, realizável ou RNG. Uma das limitações da formulação standard é a

aplicabilidade apenas a escoamentos completamente turbulentos (ANSYS Inc. 2019); dado que os *raceways* apresentam zonas de baixa velocidade, existe a possibilidade de o regime turbulento não ser atingido e a solução vir afetada. A formulação realizável contabiliza a rotação do escoamento na definição da viscosidade turbulenta, proporcionando melhores resultados do que a standard. A variante RNG corrige os defeitos apontados aos outros métodos, contabiliza os vórtices na turbulência e os efeitos de baixo número de Reynolds na viscosidade efetiva (ANSYS Inc. 2019). Uma vez que se pretende estudar em detalhe a roda de pás, utiliza-se uma malha deslizante, em detrimento de uma fonte de quantidade de movimento. Assim, a variante realizável do modelo  $k-\varepsilon$  não deve ser usada, para que a viscosidade turbulenta não tome valores artificiais (ANSYS Inc. 2019). A escolha mais adequada é, portanto, a formulação RNG.

## 2.2 Condições de fronteira

As paredes são principal fonte de vorticidade e turbulência num escoamento, pelo que é necessária uma atenção especial na proximidade deste tipo de condição de fronteira, usando funções de parede para ligar a zona logarítmica à parede, evitando calcular a subcamada viscosa e a zona tampão (Figura 5), ou adotando termos de amortecimento e adicionando a viscosidade molecular ao modelo, para o resolver até à parede, com um refinamento adequado da malha (White 1974). A escolha recaiu na modelação até à parede, pela necessidade de que a influência das pás seja contabilizada com a maior precisão possível, e pela grande variação do escoamento no espaço, que seria difícil de tratar com funções de parede, por existir uma grande amplitude de valores de  $y^+$ , ou seja, da distância adimensionalizada do primeiro nó à parede. O tratamento junto à parede de Menter-Lechner é o mais adequado para este caso, uma vez que não é sensível ao valor de  $y^+$ , e, ao contrário do tratamento melhorado da parede (*Enhanced Wall Treatment*), não utiliza o número de Reynolds para dividir o domínio em região afetada pela viscosidade e em região turbulenta. A utilização do número de Reynolds pode induzir o tratamento de uma zona de baixa velocidade como próxima da parede, mesmo que ela esteja longe, comprometendo a validade dos resultados. O tratamento de Menter-Lechner comporta-se como um modelo de baixo Reynolds com malhas suficientemente refinadas e tende para uma função de parede quando a malha é mais grosseira (ANSYS Inc. 2019).

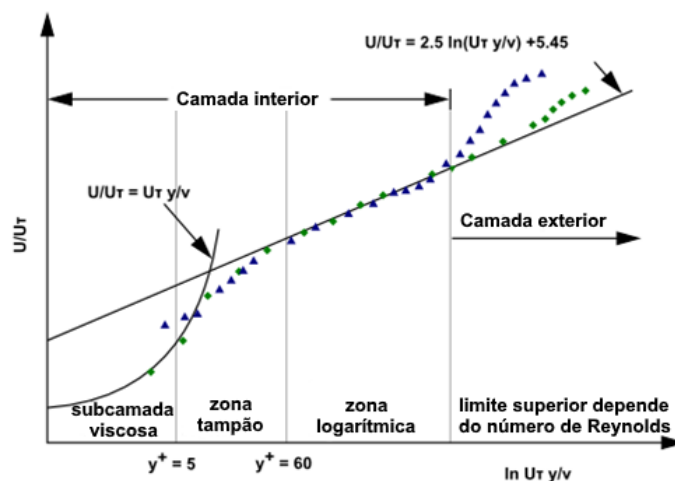


Figura 5 – Subdivisões da camada limite. Adaptado de ANSYS Inc. (2019).

Tendo em conta as características de um *raceway pond*, as condições de fronteira são apenas dos tipos saída de pressão (*pressure-outlet*) e parede (*wall*), dependendo da localização. Os limites definidos como parede são as faces do domínio em contacto com a água e as pás da roda, devendo-se indicar que as últimas são paredes rotativas (por estarem numa zona de malha rotativa). As saídas de pressão são as faces na parte superior do domínio, que só contactam com o ar.

## 2.3 Modelo do *raceway pond*

O *software* CFD utilizado nas simulações necessárias a este trabalho foi o ANSYS Fluent, versão 2019 R1. Tratando-se de uma versão académica, as simulações estão limitadas a 512 000 elementos e a 16 processos em paralelo. As geometrias foram desenhadas no Solidworks 2018 e importadas através do ANSYS Design Modeler. Na Figura 6 é representado o domínio gerado.

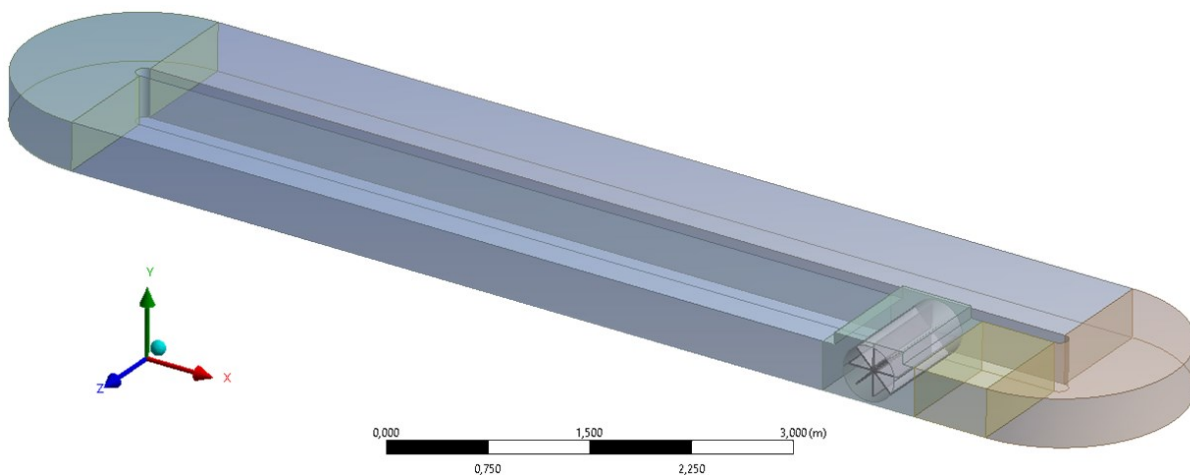


Figura 6 – Modelo do *raceway pond*.

A malha computacional foi gerada no ANSYS Meshing, utilizando-se elementos hexaédricos para criar uma malha estruturada nos canais e nas curvas, e elementos tetraédricos na zona cilíndrica que contém a roda de pás (Figura 7). A distorção dos elementos deve ser baixa, para minimizar o erro de interpolação entre elementos, não devendo ultrapassar o valor de 0,95. Os gradientes são calculados pelo método dos mínimos quadrados, por ser um processo de cálculo mais rápido do que as alternativas de Green-Gauss, e tem boa exatidão, mesmo em malhas com elevada distorção (ANSYS Inc. 2019).

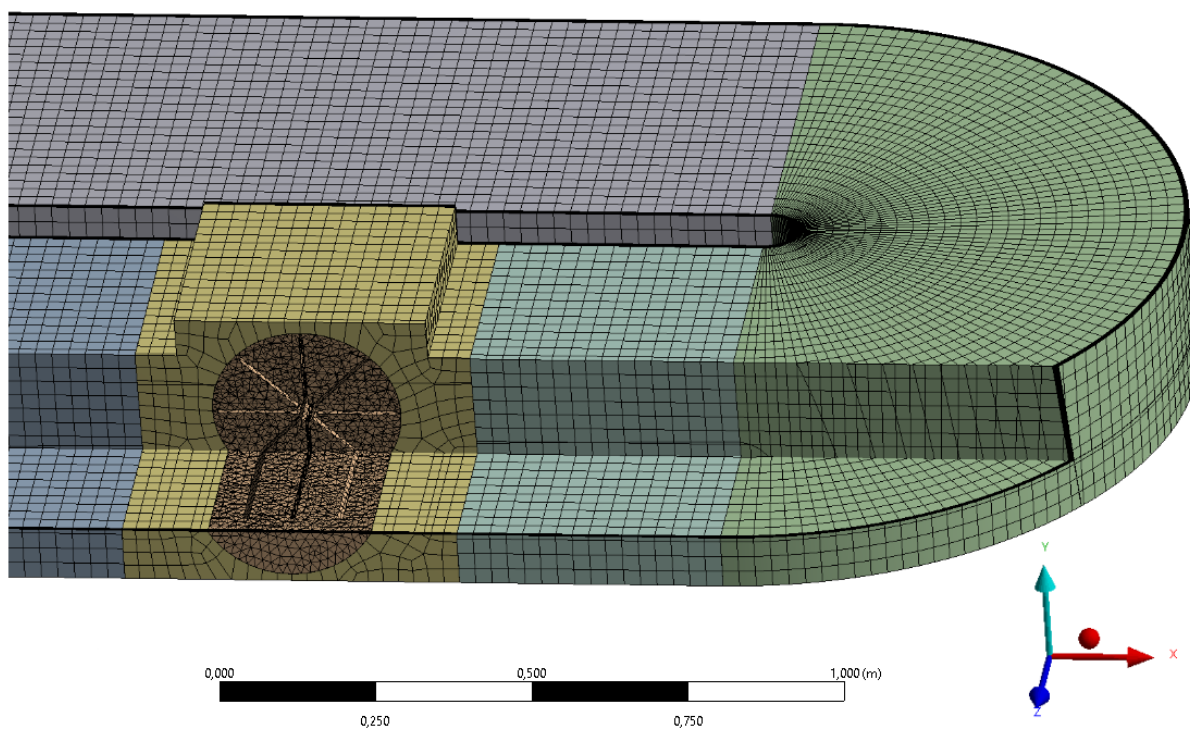


Figura 7 – Vista em corte da malha computacional do modelo, estruturada nos canais e nas curvas, e não-estruturada na zona da roda de pás. A linha espessa na proximidade das paredes corresponde a um refinamento da malha.

A dimensão dos elementos foi inserida de modo a obter-se um número de elementos próximo dos 380 000 utilizados por Huang et al. (2015). As configurações da malha ficaram:

- Dimensão dos elementos (*Element Size*): 0,05 m;
- Dimensão máxima (*Max Size*): 0,1 m;
- Distorção alvo (*Target Skewness*): 0,7;
- Suavização (*Smoothness*): elevada;
- Dimensão dos elementos na zona da roda de pás (*Body Sizing*): 0,025 m;
- Refinamento em todas as paredes em contacto com o fluido, com 15 camadas e espessura da primeira camada de 40  $\mu\text{m}$  e um fator de expansão de 1,2.

A referência tomada para a dimensão da camada de refinamento foi a escala de comprimento de Kolmogorov (Equação 2.1), que pode ser calculada a partir da viscosidade cinemática ( $\nu$ ) e da taxa de dissipação da energia cinética de turbulência ( $\varepsilon$ ), um resultado das simulações. Trata-se, portanto, de um processo iterativo. Como valor inicial, adotou-se o valor obtido por Hadiyanto et al. (2013), 100  $\mu\text{m}$ , que foi sendo corrigido no curso das simulações até aos 40  $\mu\text{m}$ , já apresentados.

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (2.1)$$

Os valores obtidos para o *aspect ratio* e para a distorção são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão do *aspect ratio* e distorção da malha

	Com refinamento (395 645 elementos)		Sem refinamento (145 268 elementos)	
	<i>Aspect Ratio</i>	Distorção	<i>Aspect Ratio</i>	Distorção
<b>Média</b>	381,38	0,23341	1,8005	0,13325
<b>Mínimo</b>	1,0197	$7,1987 \times 10^{-5}$	1,0208	$1,3057 \times 10^{-10}$
<b>Máximo</b>	3057,7	0,80588	14,704	0,85822
<b>Desvio Padrão</b>	475,53	0,16905	1,4308	0,14943

O valor do *aspect ratio* é muito elevado, devido à presença do refinamento junto às paredes. Dado que o refinamento se encontra na camada limite, um valor elevado pode não indicar uma malha de má qualidade (ANSYS Inc. 2016). Fora do refinamento, tanto o *aspect ratio* como a distorção são indicadores de uma malha com boa qualidade.

O valor do passo temporal utilizado por Prussi et al. (2014) foi de 0,001 s, com a formulação Runge-Kutta de segunda ordem, enquanto que Hreiz et al. (2014) usaram o valor de 0,009 s e a formulação temporal implícita de segunda ordem. Amini et al. (2016) verificaram que valores superiores a 0,01 s resultavam em divergência. Por outro lado, alguns autores optam por uma simulação de regime permanente (Sompech, Chisti, e Srinophakun 2012; Pirasaci et al. 2017; Hadiyanto et al. 2013). Como se escolheu a técnica da malha rotativa para simular a rotação das pás, é necessário fazer um estudo transiente. O objetivo era ajustar o passo temporal à média espacial da escala de tempo de Kolmogorov (Equação 2.2), mas verificou-se que tal não era exequível, e optou-se por um ajuste ao longo da simulação.

$$\tau = \left( \frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

O valor do passo temporal era reduzido quando a velocidade média no plano em estudo começava a diminuir, e assim se mantinha durante um grande número de passos temporais.



Com esta diminuição, a solução voltava a evoluir favoravelmente. A formulação adotada foi a implícita de primeira ordem, por se terem verificado problemas de convergência com a formulação de segunda ordem. A necessidade de reduzir o passo temporal está relacionada com problemas na malha, o que será discutido na secção 3.1, dedicada à validação do modelo.

## 2.4 Modelo do canal de ensaio

Uma avaliação sistemática num *raceway pond* não é adequada, devido à afetação da forma do *raceway* na solução e à morosidade das simulações num escoamento deste tipo (vários meses). Para colmatar estas dificuldades, definiu-se um canal de ensaio, aberto nas extremidades (Figura 8). As considerações necessárias para construir o modelo do canal são idênticas às apresentadas na secção 2.3.

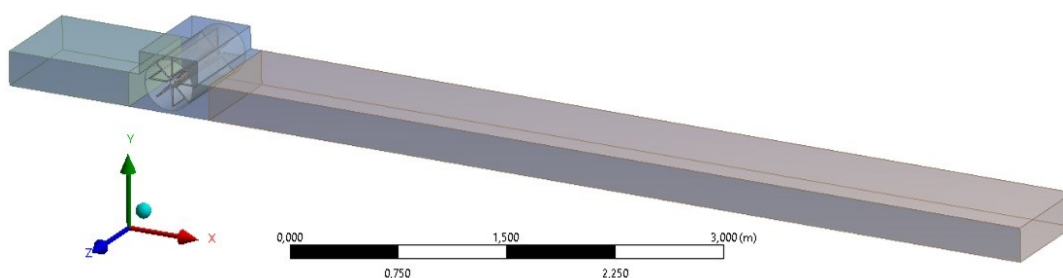


Figura 8 – Canal de ensaio.

Ao contrário do *raceway pond*, que não tinha entradas nem saídas de água, como este modelo consiste num canal aberto, é necessário especificar uma condição de fronteira adequada, para minimizar a influência desta simplificação nos resultados. A secção de entrada, no modelo *Volume of Fluid*, pode ser definida como entrada de pressão ou fluxo de massa (ANSYS Inc. 2019). Como se pretende que o escoamento seja induzido apenas pela rotação das pás, a opção mais adequada é a entrada de pressão. Esta escolha condiciona o tipo da secção de saída, que só pode ser uma saída de pressão, por limitação do modelo *Volume of Fluid* (ANSYS Inc. 2019).

O número de elementos resultante é de 243 204, dos quais 23,6% estão localizados na zona de malha deslizante. As métricas de qualidade da malha são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de controlo da qualidade da malha no canal de referência

	Com refinamento (243 204 elementos)		Sem refinamento (90 724 elementos)	
	<i>Aspect Ratio</i>	Distorção	<i>Aspect Ratio</i>	Distorção
<b>Média</b>	294,73	0,23014	1,5357	0,13905
<b>Mínimo</b>	1,0218	$1,4955 \times 10^{-4}$	1,0187	$1,3057 \times 10^{-10}$
<b>Máximo</b>	1614,2	0,89044	13,148	0,90032
<b>Desvio Padrão</b>	362,57	0,16850	0,61911	0,16731

Aqui repete-se o que sucedeu no modelo do *raceway pond*, na medida em que o *aspect ratio* é muito elevado por causa da camada de refinamento. O passo temporal foi fixado em 0,01 s, e não se verificaram problemas de convergência que obrigassem a um ajuste no decorrer das simulações.



### 3 Análise de resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de todas as simulações realizadas. Inicia-se com a validação do modelo do *raceway pond*, seguindo-se a descrição do procedimento de otimização, dos parâmetros característicos de uma roda de pás, dos indicadores de produtividade e são caracterizadas as configurações da roda que conduziram à sua otimização.

#### 3.1 Validação do modelo numérico

Huang et al. (2015) validaram experimentalmente o seu modelo de *raceway pond* acionado por uma roda de pás, obtendo uma boa correlação entre resultados. Os contornos da magnitude da velocidade e da componente vertical do vetor da velocidade são apresentados nas Figuras 9 e 10, respetivamente. Dado que a configuração destes autores foi a base do modelo exposto na secção 2.3, também os seus resultados foram tomados como referência para validar indiretamente o modelo desenvolvido.

Magnitude da Velocidade

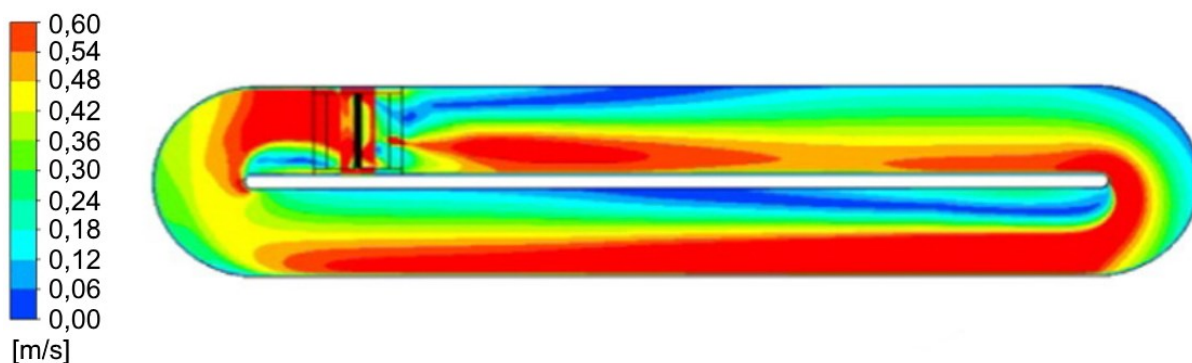


Figura 9 – Contornos da magnitude da velocidade obtidos por Huang et al. (2015) (adaptado).

Magnitude da componente vertical da Velocidade

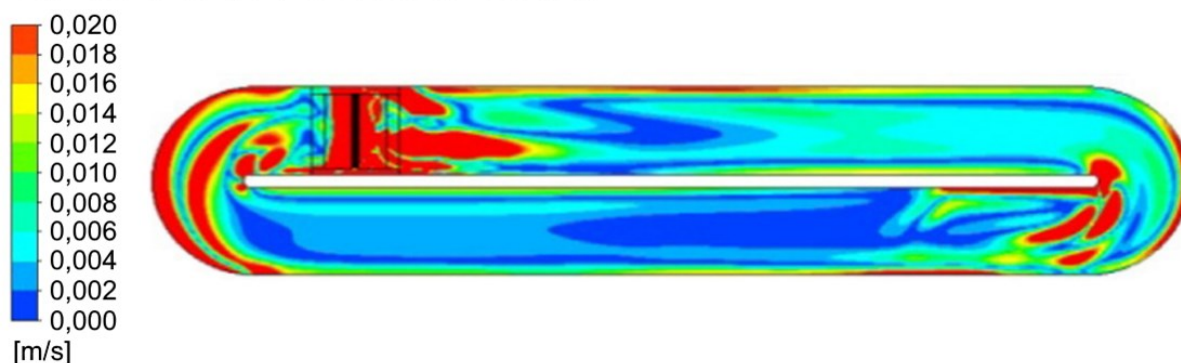


Figura 10 – Contornos da componente vertical do vetor velocidade obtidos por Huang et al. (2015) (adaptado).

A validação indireta do modelo revelou-se problemática, pela morosidade do processo e, apesar dos contornos apresentarem uma aparência próxima da Figura 9, na tentativa de acelerar a solução, aumentava-se o valor do passo temporal e a velocidade média no plano em análise começava a diminuir, e rapidamente a solução distanciava-se do objetivo. Além disso, não se conseguia obter uma forma semelhante aos contornos da componente vertical da velocidade encontrados por Huang et al. (2015), apresentados na Figura 10. Reduzindo o passo, a velocidade voltava a aumentar, e quanto menor o seu valor, maior o declive da curva da velocidade. Quando um passo de 0,0005 s se tornou insuficiente para a velocidade continuar a aumentar e a solução se aproximar do objetivo, procurou-se uma justificação para este facto. A condição de Courant-Friedrichs-Lewy (*CFL*), Equação 3.1, relaciona o passo temporal com a velocidade do escoamento e a dimensão da malha, e é um indicador importante para obter convergência. No caso de esquemas implícitos, não existe um limite teórico, mas é conveniente usar valores próximos de 10 e evitar ultrapassar os 100 (ANSYS Inc. 2019). Para um esquema explícito, deve ser inferior à unidade.

$$CFL = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (3.1)$$

O valor máximo de *CFL* em todo o domínio era de apenas 0,4, pelo que, teoricamente, o passo temporal poderia ser muito superior, uma vez que são utilizados métodos implícitos. Assim, virou-se o foco para a dimensão da malha para encontrar a causa do problema. Em vez da escala de comprimento de Kolmogorov, pode utilizar-se a distância adimensional à parede,  $y^+$  (Equação 3.2), para verificar a adequabilidade da dimensão da malha.

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu}, \quad (3.2)$$

onde  $u_*$  é a velocidade de fricção (Equação 3.3),  $y$  é a distância à parede mais próxima e  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (3.3)$$

onde  $\tau_w$  é a tensão de corte na parede e  $\rho$  é a massa volúmica na parede. No caso de se usarem funções de parede, os valores de  $y^+$  devem estar compreendidos entre 15 e 300. No método de Menter-Lechner, por permitir a transição de um tratamento de proximidade para uma função de parede, a camada de refinamento deve cobrir toda a extensão da camada limite, não sendo preponderante garantir um valor de  $y^+$  (ANSYS Inc. 2019). Aferindo os valores de  $y^+$ , constatou-se que eram muito baixos na maioria do domínio, na ordem de  $10^{-1}$ , e o máximo era na roda de pás, com o valor de 230, concluindo-se que seria preferível um refinamento nesta zona, em vez de nas restantes paredes, onde devia ser aumentada a dimensão da malha. Assim, as escalas de Kolmogorov não asseguram a criação de uma boa malha nem a escolha de um passo temporal adequado. Na realidade, estes valores só assumem uma importância significativa nos métodos DNS e LES, devendo, nestes casos, a malha ter uma dimensão inferior em todo o domínio, e não apenas numa camada de refinamento na proximidade das paredes (ANSYS Inc. 2019).

Posteriormente, encontrou-se, numa apresentação (ANSYS Inc. 2016), que o Fluent tem um valor limite do valor do *aspect ratio*, entre 10 e 100, dependendo do *solver*, mas sem indicar mais detalhes. Tanto no manual teórico, como no manual do utilizador, não existe nenhuma referência a este valor, nem às limitações do *solver* em relação ao valor máximo de *aspect ratio*. Recordar-se que o valor máximo na malha era superior a 3 000, e o valor médio era 381, pelo que os limites do programa estavam a ser claramente ultrapassados.

No manual teórico é apresentado um método para estimar a altura da camada limite, baseado no ponto de viscosidade turbulenta máxima, que corresponde, aproximadamente, a

metade da altura da camada (ANSYS Inc. 2019). Comparando esta informação com a da derivada  $du/dy$ , verificou-se que existia coincidência na localização do topo da camada limite, que se encontrava praticamente no segundo nó da malha principal. Assim, a camada de refinamento cobria uma parte muito reduzida da camada limite.

Seguindo estas novas informações, criou-se uma malha com um refinamento menos acentuado, a cobrir uma maior distância à parede e com menor crescimento entre camadas (3%, porque o valor por omissão de 20% é muito elevado), e usaram-se elementos mais pequenos, o que favorece o *aspect ratio*. Os parâmetros adotados para a nova malha foram:

- Dimensão dos elementos: 0,04 m;
- Dimensão máxima: 0,1 m;
- Fator de expansão: 1,03;
- Distorção alvo: 0,7;
- Suavização: elevada;
- Dimensão dos elementos na zona da roda de pás: 0,022 m;
- Dimensão dos elementos na zona contígua à roda de pás: 0,038 m;
- Refinamento em todas as paredes em contacto com o fluido, com 10 camadas e espessura da primeira camada fixada em 1 mm.

Não foi possível estender o refinamento a toda a camada limite, devido a limitações da técnica da malha deslizante. O número de elementos resultante foi de 504 341, dos quais cerca de 25% se encontra no cilindro que contém a roda de pás. As métricas da qualidade da malha são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Métricas de qualidade da malha reformulada

	<i>Aspect Ratio</i>	<b>Distorção</b>
<b>Média</b>	24,098	0,20376
<b>Mínimo</b>	1,0184	$2,8973 \times 10^{-4}$
<b>Máximo</b>	81,893	0,80549
<b>Desvio Padrão</b>	22,696	0,17081

Interpolando-se os resultados anteriores como valores iniciais no novo domínio, verificou-se que os resultados se tornaram independentes do passo temporal, indicando que a causa para o problema de convergência estava numa malha de má qualidade. O valor definido para o passo foi 0,01 s. Os contornos obtidos da magnitude da velocidade são apresentados na Figura 11, e os da magnitude da componente vertical na velocidade na Figura 12.

Magnitude da Velocidade

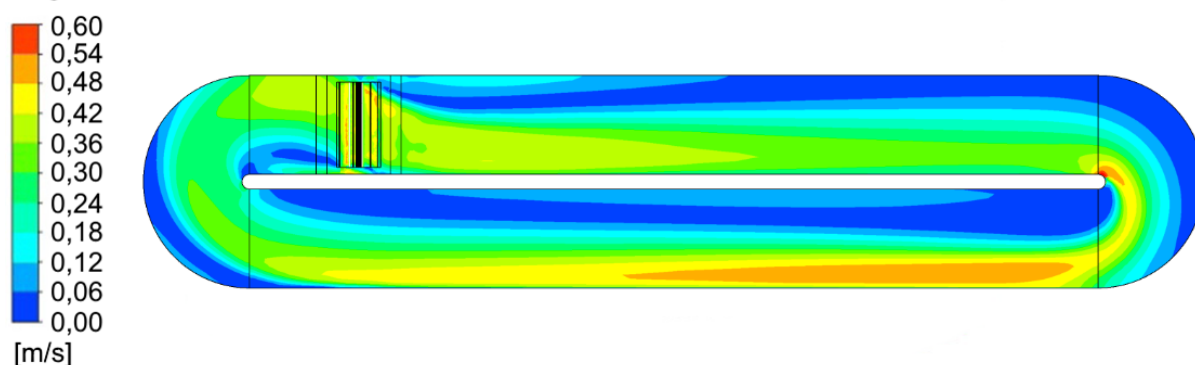


Figura 11 – Contornos da magnitude da velocidade obtidos na validação do modelo.

Magnitude da componente vertical da Velocidade

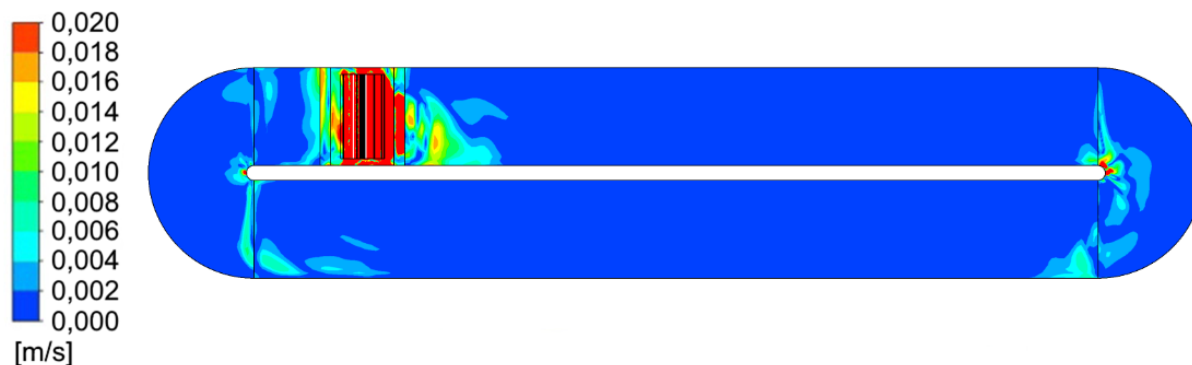


Figura 12 – Contornos da componente vertical da velocidade obtidos na validação do modelo.

Apesar de se ter verificado uma evolução muito favorável nos contornos com a nova malha, a solução não continuou a aproximar-se do pretendido. Houve um crescimento significativo das zonas de baixa velocidade nos canais do *raceway* e as velocidades não atingiram os valores encontrados por Huang et al. (2015). Comparando os contornos com outras referências, no entanto, e verifica-se que as zonas de baixa velocidade são mais predominantes do que na Figura 9, mas não tanto como na Figura 11. Em relação à componente vertical da velocidade, não foram atingidos os objetivos, possivelmente consequência das interfaces entre os domínios em que se subdivide o sistema. No ANSYS Fluent não existe a opção de usar fronteiras imersas (*immersed boundary*), que poderiam suprir este problema, reduzindo os problemas de acoplamento, nomeadamente na conservação dos fluxos de quantidade de movimento. A natureza não conservativa é notória na variação abrupta da velocidade vertical na interface a jusante da roda, em que os contornos da Figura 12 passam de vermelho a uma coloração entre verde e amarelo.

Para proporcionar melhores resultados às simulações que recorreram ao canal de ensaio, descrito na secção 2.4, estenderam-se as alterações indicadas também a este modelo. Este problema foi detetado numa fase intermédia do trabalho e, por causa do tempo computacional requerido, não foi possível refazer todas as simulações. Os resultados obtidos nas duas malhas serão comparados na secção 3.3.

### 3.2 Otimização da roda de pás

O procedimento para otimizar o desempenho da roda de pás seguiu os seguintes passos:

1. Introduzir pontos de fuga, para a água não ficar acumulada nas pás;
2. Para a geometria de Referência, otimizar a distância entre as pás e o fundo do tanque;
3. Para a melhor geometria de 2, otimizar a distância às paredes laterais;
4. Para a melhor geometria de 3, otimizar o diâmetro da roda;
5. Para o melhor caso anterior, estudar o efeito do número de pás.

A avaliação do desempenho da roda de pás foi condensada no estudo do escoamento em dez planos, três horizontais e sete verticais, uma vez atingido um regime estatisticamente estacionário. Os planos horizontais são designados por PH $x$  e os planos verticais por PV $y$ , em que  $x$  é um número de 1 a 3 e  $y$  é um número de 1 a 7. A posição dos planos no canal é apresentada na Figura 13, e as suas coordenadas na Tabela 4, em função da altura de água, nos planos horizontais, e do diâmetro, nos planos verticais.

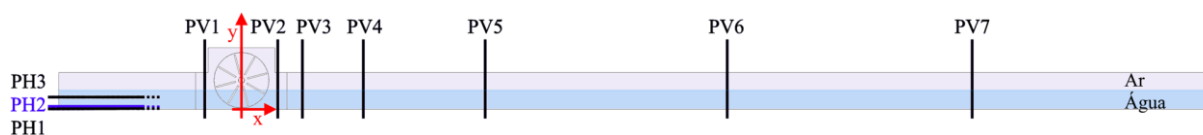


Figura 13 – Posição dos planos de análise no canal de ensaio.

Tabela 4 – Posicionamento dos planos, em relação ao referencial da Figura 13, em função do diâmetro ( $D$ ) e da altura de água ( $H$ )

Plano	Posição
PH1	$y = 0,0333H$
PH2	$y = 0,133H$
PH3	$y = 0,667H$
PV1	$x = -0,706D$
PV2	$x = 0,706D$
PV3	$x = 1,18D$
PV4	$x = 2,35D$
PV5	$x = 4,71D$
PV6	$x = 9,41D$
PV7	$x = 14,1D$

A evolução da velocidade nos vários planos foi aferida ao longo da simulação e, quando se atingiu um regime estatisticamente estacionário, registaram-se os dados de cada plano em ficheiros csv, num intervalo equivalente a dois períodos. A taxa de amostragem foi escolhida com o critério de capturar os harmónicos de maior frequência, mas sem obrigar ao processamento de um número excessivo de instantes. Os indicadores avaliados em cada geometria foram:

- Mistura vertical;
- Velocidades média e máxima;
- Percentagem de zonas mortas;
- Potência de acionamento.

A mistura vertical ( $mv$ ) foi verificada pela Equação 1.3, proposta por Prussi et al. (2013), correspondente à razão entre a componente vertical da velocidade ( $v$ ) e a magnitude do vetor velocidade ( $V$ ). O número de Reynolds não foi usado na análise de resultados como uma medida da turbulência do escoamento, por depender apenas da velocidade média no plano em questão, dado que as dimensões do canal não se alteram entre simulações. Assim, ao definir a velocidade média, o número de Reynolds está implícito nesse valor. Num canal aberto, o regime turbulento inicia-se, aproximadamente, para  $Re$  superiores a 12 500 (Munson et al. 2009). O número de Reynolds no canal é na ordem dos 110 000, o que corresponde claramente a um regime turbulento.

Em cada instante são avaliadas as velocidades média e máxima, a mistura vertical e a percentagem de zonas mortas. Os elementos contidos na zona de malha deslizante e os que têm uma fração volúmica de água inferior a 95% são excluídos da análise. Esta exclusão deve-se à utilização, no modelo *Volume of Fluid*, da percentagem de volume de cada fluido, em cada elemento da malha, para identificar os que contêm água, ar, e definir, ainda, a interface água-ar. Os valores médios são calculados através de uma média pesada com o volume dos elementos e, posteriormente, a partir dos valores instantâneos, calculam-se as médias no tempo, em que o peso é o número de elementos válidos para a análise em cada instante. A percentagem de zonas

mortas, como já foi referido anteriormente, corresponde à fração de volume de água com velocidade inferior a 0,1 m/s.

A potência de acionamento da roda pode ser estimada a partir de diferentes metodologias. A primeira é a partir da potência de uma bomba, dada pelo produto do caudal ( $Q$ ) pela diferença de pressões entre a entrada e a saída ( $\Delta p$ ), Equação 3.4.

$$P = Q \cdot \Delta p \quad (3.4)$$

A potência também pode ser calculada pela Equação 3.5, fazendo o produto do binário ( $B$ , calculado pelo programa) pela velocidade de rotação da roda de pás ( $n$ , imposta). Esta expressão tem a vantagem de contabilizar também a energia despendida a movimentar o ar.

$$P = B \cdot n \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (3.5)$$

Uma terceira alternativa é proposta por Pirasaci et al. (2017), que permite obter a potência de acionamento a partir de estimativas das forças de arrasto ( $F_d$ ) e de impulso ( $F_t$ ), envolvendo o cálculo das Equações 3.6 a 3.21, segundo a descrição da Figura 14.

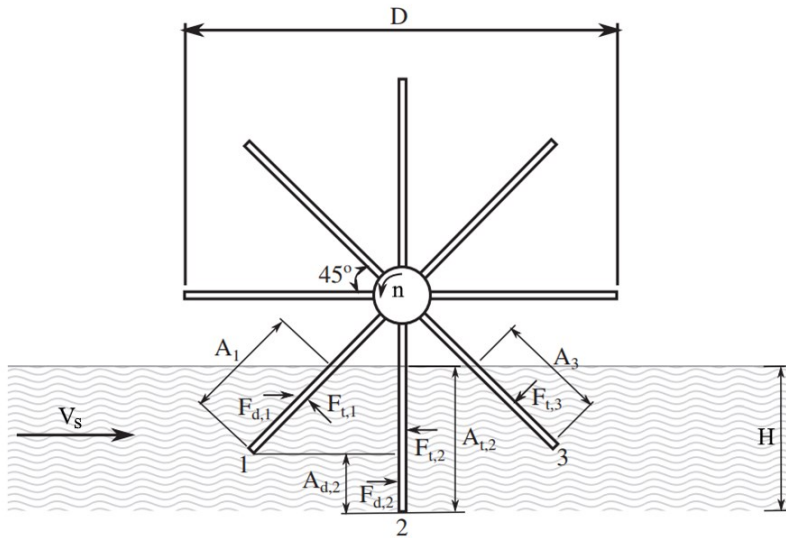


Figura 14 – Metodologia proposta por Pirasaci et al. (2017) (adaptado).

- **Pá 1**

$$A_1 = l_p \cdot \left( D/2 - \frac{D/2 - H}{\cos 45^\circ} \right) \quad (3.6)$$

$$r_1 = \frac{1}{2} \left( D/2 + \frac{D/2 - H}{\cos 45^\circ} \right) \quad (3.7)$$

$$v_{d,1} = V_s - \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot r_1 \cdot \cos 45^\circ \quad (3.8)$$

$$F_{t,1} = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \left( \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot r_1 \right)^2 \cdot A_1 \quad (3.9)$$

$$F_{d,1} = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot v_{d,1} \cdot |v_{d,1}| \cdot A_1 \quad (3.10)$$

- **Pá 2**

$$A_{t,2} = l_p \cdot h \quad (3.11)$$



$$r_{t,2} = \frac{1}{2}(D - h) \quad (3.12)$$

$$A_{d,2} = D/2 \cdot l_p \cdot (1 - \cos 45^\circ) \quad (3.13)$$

$$r_{d,2} = D/4 (1 + \cos 45^\circ) \quad (3.14)$$

$$v_{d,2} = V_s - \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot r_{t,2} \quad (3.15)$$

$$F_{t,2} = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \left( \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot r_{t,2} \right)^2 \cdot A_{t,2} \quad (3.16)$$

$$F_{d,2} = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot v_{d,2} \cdot |v_{d,2}| \cdot A_{d,2} \quad (3.17)$$

• **Pá 3**

$$A_3 = l_p \cdot \left( D/2 - \frac{D/2 - H}{\cos 45^\circ} \right) \quad (3.18)$$

$$r_3 = \frac{1}{2} \left( D/2 + \frac{D/2 - H}{\cos 45^\circ} \right) \quad (3.19)$$

$$F_{t,3} = \frac{C_D}{2} \cdot \rho \left( \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot r_3 \right)^2 \cdot A_3 \quad (3.20)$$

A potência é dada pela Equação 3.21.

$$P = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot \left( \sum -r_{t,i} \cdot F_{t,i} + \sum r_{d,i} \cdot F_{d,i} \cdot \cos 45^\circ \right) \Leftrightarrow \quad (3.21)$$

$$\Leftrightarrow P = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot (-r_1 \cdot F_{t,1} - r_{t,2} \cdot F_{t,2} - r_3 \cdot F_{t,3} + r_1 \cdot F_{d,1} \cdot \cos 45^\circ + r_{d,2} \cdot F_{d,2} \cdot \cos 45^\circ)$$

No trabalho de Pirasaci et al. (2017) é apresentada uma tabela com dados experimentais e os obtidos numericamente, para diferentes valores de  $C_D$ . O valor de  $C_D$  escolhido para cada caso era o que melhor ajustava as simulações aos valores experimentais, revelando que este método depende de um parâmetro que é difícil de prever. O valor médio dos  $C_D$  que melhor ajustaram cada caso individual é 1,60, com um desvio padrão de 0,36.

Para que o este estudo seja mais facilmente generalizado, as dimensões da roda de pás e do *raceway pond* foram adimensionalizadas. A razão de distância ao fundo (*rdf*) é a razão entre a distância livre da pá ao fundo do tanque (*d*) e a altura da coluna de água no tanque (*H*), Equação 3.22.

$$rdf = \frac{d}{H} \quad (3.22)$$

A razão de distância lateral (Equação 3.23) é uma medida da influência da distância lateral livre entre a roda e as paredes do tanque.

$$rdl = \frac{l_c - l_p}{l_c}, \quad (3.23)$$

onde  $l_c$  e  $l_p$  correspondem, respetivamente, à largura do canal e à largura das pás da roda. A razão entre o diâmetro ( $D$ ) e a profundidade da água ( $rdp$ ), Equação 3.24, é o indicador para estudar a influência do diâmetro da roda de pás.

$$rdp = \frac{D}{H} \quad (3.24)$$

Na Figura 15 são ilustrados os parâmetros que definem os números adimensionais das Equações 3.22 a 3.24.

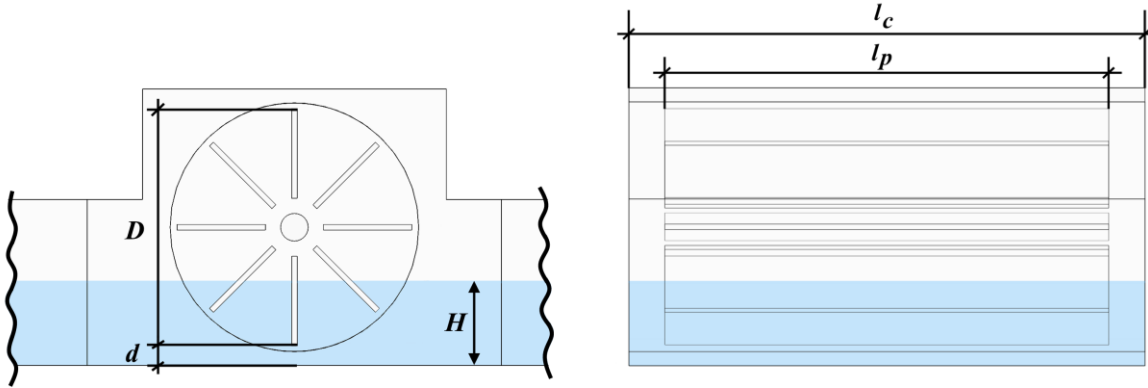


Figura 15 – Parâmetros usados na adimensionalização.

As várias configurações são apresentadas nas secções seguintes, com as designações “Referência” e “Geo”. A “Referência” corresponde aos parâmetros usados por Huang et al. (2015), excetuando a simplificação do *raceway* num canal. As “Geo” (abreviatura de Geometria) são as variações de configuração, com o objetivo de otimizar a roda, segundo o procedimento apresentado no início deste capítulo. No capítulo 3.4, é apresentado um sumário dos parâmetros caraterísticos de cada configuração; no Anexo A faz-se uma análise gráfica dos resultados.

### 3.2.1 Referência

A potência de acionamento é indicada na literatura, por vezes, em função da área superficial, sendo relatados valores compreendidos entre 0,22 e 1,12 W/m<sup>2</sup> (Prussi et al. 2014 e Rogers et al. 2014). Também se encontra em função do volume de água, sendo, geralmente, superior a 4 W/m<sup>3</sup> (Kumar et al. 2015). A especificação em função do volume será a utilizada, por ter em conta a altura de água no canal e, desta forma, apresentam-se indicadores independentes das dimensões dos domínios utilizados. Utilizando os três métodos apresentados para calcular a potência, e dividindo o seu valor pelo volume de água no canal, chegou-se às seguintes conclusões:

- A Equação 3.4 trata a roda de pás como uma bomba volumétrica, que por definição, não apresenta fugas. Esta é uma aproximação muito grosseira, pois existem espaços livres entre a pá e o tanque. A energia despendida a movimentar o ar é desprezada, devido à dificuldade em definir o caudal de ar e a respetiva diferença de pressões. O valor obtido para a potência foi 1,6 W/m<sup>3</sup>;
- A Equação 3.5 é de cálculo muito simples, porque basta pedir ao programa que calcule o binário nas paredes que definem a roda de pás, definindo as coordenadas do centro de rotação e a direção do vetor rotação. Esta expressão tem a vantagem de contabilizar a movimentação do ar. A potência calculada foi 6,0 W/m<sup>3</sup>;
- A metodologia de Pirasaci et al. (2017) tem as desvantagens de não ter em conta o efeito do ar e a difícil quantificação das alterações de geometria no valor de  $C_D$ . O valor obtido foi 5,3 W/m<sup>3</sup>, para um  $C_D = 1,60$ .

Assim, concluiu-se que a Equação 3.5 é a mais adequada para a aplicação e para as necessidades do estudo, sendo a adotada, por omissão, nos futuros cálculos de potência.

Neste caso de Referência, os valores dos números adimensionais das Equações 3.22 a 3.24 são:  $rd\bar{f} = 0,200$ ,  $rdl = 0,860$  e  $rdp = 2,833$ . Os valores médios finais são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Referência

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{m\acute{a}x}$ [m/s]	$\overline{v/V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,229	0,334	0,002	3,6	6,0
PH2	0,230	0,326	0,004	3,1	
PH3	0,272	0,485	0,004	2,0	
PV1	0,271	0,301	0,026	2,0	
PV2	0,263	0,481	0,028	19,4	
PV3	0,241	0,417	0,016	18,2	
PV4	0,236	0,384	-0,004	12,9	
PV5	0,242	0,344	-0,004	1,4	
PV6	0,248	0,303	-0,001	1,0	
PV7	0,246	0,296	0,001	1,7	

Analisando os resultados da Tabela 5, verifica-se que os valores dos planos PH1 e PH2 são semelhantes, a componente vertical é muito menor do que a magnitude do vetor velocidade e as percentagens de zonas mortas nos três planos a seguir à roda são elevadas. Como seria de esperar, a diferença entre as velocidades média e máxima diminui à medida que a distância à roda aumenta.

### 3.2.2 Geo-1

Esta nova configuração da roda de pás, chamada “Geo-1”, corresponde ao passo 1 e à primeira iteração do passo 2 do procedimento de otimização. A zona de fuga ajuda a que a água não fique retida entre as pás no movimento ascendente, conforme acontecia na simulação de Referência, facilitando a sua saída. A redução do espaçamento concretizou-se com uma redução do valor de  $rd\bar{f}$  (Equação 3.22) de 0,20 para 0,133, com o principal objetivo de diminuir as zonas mortas no fundo do tanque. Os valores médios finais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-1

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{m\acute{a}x}$ [m/s]	$\overline{v/V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,234	0,348	0,002	2,4	6,6
PH2	0,234	0,348	0,002	2,4	
PH3	0,287	0,478	0,006	1,8	
PV1	0,290	0,318	0,023	2,1	
PV2	0,261	0,477	-0,006	17,9	
PV3	0,244	0,409	-0,018	18,6	
PV4	0,247	0,384	-0,006	10,6	
PV5	0,255	0,344	-0,004	1,6	
PV6	0,260	0,317	0,000	2,3	
PV7	0,258	0,315	0,001	2,3	

Relativamente à Referência, houve um aumento da velocidade média nos planos horizontais (3,3%) e verticais (4,8%), exceto no PV2, onde baixou 0,7%. Deu-se uma redução de 0,4% na mistura vertical no PH2 e nos planos verticais a jusante da roda, e um aumento de 0,6% no PH3. As zonas mortas beneficiaram de uma redução, sobretudo nos planos horizontais (-0,2%). A potência de acionamento aumentou 10% (0,6 W/m<sup>3</sup>).

### 3.2.3 Geo-2

Nesta configuração intermediária entre a Referência e a Geo-1, altera-se a distância livre para o valor que conduz a um  $rdf = 0,167$  (Equação 3.22). Os valores médios finais são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-2

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{máx}$ [m/s]	$\bar{v}/\bar{V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,233	0,341	0,002	2,5	5,9
PH2	0,233	0,341	0,002	2,5	
PH3	0,285	0,470	0,006	1,9	
PV1	0,286	0,315	0,027	2,1	
PV2	0,259	0,471	-0,003	17,9	
PV3	0,244	0,408	-0,013	18,6	
PV4	0,246	0,385	-0,006	11,0	
PV5	0,253	0,349	-0,003	1,7	
PV6	0,258	0,319	0,000	2,3	
PV7	0,257	0,316	0,001	2,3	

Esta configuração proporciona uma potência de acionamento inferior aos dois casos anteriores (-1,7% e -10,6%, relativamente à Referência e Geo-1, respetivamente), enquanto produz um escoamento com velocidades e percentagens de zonas mortas idênticas à Geo-1. A mistura é melhor do que a Geo-1 (9,1%), mas inferior à Referência (-14,7%).

### 3.2.4 Geo-3

Como se verificou que a mistura vertical tende a melhorar com o aumento da distância ao fundo do tanque, estudou-se mais uma variação deste parâmetro, relativo ao passo 2 do procedimento. O valor tomado para  $rdf$  (Equação 3.22) foi 0,25, indicando que 25% da altura de água não é varrida pelas pás, prevendo-se um aumento da percentagem de zonas mortas nos planos inferiores. No entanto, antecipava-se uma menor potência, consequência da menor área varrida e, atendendo à tendência de melhoria da mistura vertical com a altura da roda, poderia ser vantajosa esta alteração, mesmo com o aumento das zonas mortas. Os valores médios finais são apresentados na Tabela 8.

Conforme previsto, a potência é inferior às geometrias anteriores (-26,6%, -32,6% e -25,4%, respetivamente, em relação à Referência, Geo-1 e Geo-2), havendo, também uma melhoria na mistura vertical, sobretudo no PV2. As velocidades média e máxima são as menores em quase todos os planos, assim como a sua amplitude. Uma baixa amplitude é vantajosa, na medida em que o escoamento tem uma velocidade mais uniforme, facilitando a sua regulação.

Tabela 8 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-3

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{máx}$ [m/s]	$\bar{v}/\bar{V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,216	0,318	0,003	2,7	4,4
PH2	0,216	0,318	0,003	2,7	
PH3	0,265	0,441	0,007	2,0	
PV1	0,268	0,312	0,046	1,8	
PV2	0,244	0,430	0,032	17,7	
PV3	0,234	0,387	-0,006	18,6	
PV4	0,234	0,360	-0,006	12,8	
PV5	0,237	0,316	-0,003	1,8	
PV6	0,240	0,296	0,000	2,3	
PV7	0,238	0,295	0,001	2,3	

Atendendo à dificuldade em comparar a potência entre as várias configurações, consequência das diferentes velocidades de escoamento, recorreu-se à relação teórica entre a potência e a velocidade sugerida por Hadiyanto et al. (2013), Equação 3.25:

$$P = c \cdot V_s^3, \quad (3.25)$$

onde  $c$  designa uma constante. Fazendo a razão entre a potência calculada ( $P$ ) e a potência estimada ( $P_e$ ), e introduzindo a definição de velocidade de estimativa ( $V_e$ ), obtém-se a Equação 3.26.

$$P_e = P \cdot \left(\frac{V_e}{V_s}\right)^3 \quad (3.26)$$

Usando a Equação 3.26 para estimar a potência necessária para obter uma velocidade de 0,3 m/s no PH3, e usando os resultados das simulações anteriores, encontraram-se os valores apresentados na Tabela 9. Desta forma, descobriu-se que a Geo-3 será a configuração mais económica, se se considerar apenas o custo de acionamento da roda.

Tabela 9 – Potência estimada para obter uma velocidade média de 0,3 m/s no plano PH3

$d/H$	Configuração	Potência estimada [W/m <sup>3</sup> ]
0,133	Geo-1	7,5
0,167	Geo-2	6,9
0,20	Referência	8,1
0,25	Geo-3	6,5

Concluiu-se que existe um comportamento não-linear em alguns indicadores de produtividade. A mistura vertical tende a melhorar com  $d/H$ , ou seja, é vantajoso colocar a roda mais afastada do fundo. Nos restantes indicadores, existe uma tendência mais bem definida, em que o aumento de  $d/H$  provoca:

- Redução da velocidade média;
- Redução da velocidade máxima;
- Diminuição da amplitude entre as velocidades máxima e média;
- Aumento da percentagem das zonas mortas.

Atendendo a que o valor de  $d/H = 0,25$  da Geo-3 proporciona a menor potência de acionamento e melhor mistura vertical do que a configuração 2, que apresenta a segunda melhor potência, optou-se pela Geo-3 para o passo seguinte da otimização, a distância livre entre as pás e as paredes laterais do tanque.

### 3.2.5 Geo-4

Nesta nova geometria, estuda-se o ponto 3 do procedimento, o espaçamento lateral das pás. Na Geo-4, toma-se o valor de  $rdl = 0,914$  (Equação 3.23), o que resulta num aumento da largura das pás, tendo em conta que todas as configurações anteriores usaram o valor de 0,85. O valor de  $rdf$  adotado foi 0,25 (Geo-3), por ser o mais vantajoso em termos de consumo de energia e de mistura vertical.

Com o aumento da largura das pás, pretendia-se reduzir as zonas mortas nos planos verticais a jusante da roda. Este parâmetro não deve ser aumentado de forma indeterminada, para que as macroalgas não quebrem ao atravessar a zona não varrida. Os valores finais estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-4

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{m\acute{a}x}$ [m/s]	$\overline{v/V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,219	0,327	0,003	1,9	4,8
PH2	0,219	0,327	0,003	1,9	
PH3	0,274	0,432	0,005	1,1	
PV1	0,275	0,318	0,047	1,8	
PV2	0,242	0,420	0,001	9,7	
PV3	0,239	0,375	-0,017	10,3	
PV4	0,240	0,349	-0,006	1,9	
PV5	0,245	0,308	-0,003	1,7	
PV6	0,247	0,293	0,000	2,3	
PV7	0,245	0,290	0,001	2,3	

Relativamente à configuração 3, tem-se uma redução significativa da percentagem de zonas mortas nos planos PV2, PV3 e PV4, em média de 9 pontos percentuais, assim como nos planos horizontais, entre 0,8 e 0,9 pontos percentuais. A mistura vertical praticamente se anula no PV2, diminui 184% no PV3 e mantém-se no PH1 e PH2. A potência de acionamento aumenta 7,1%, devido à maior área varrida pelas pás, mas o valor estimado para obter uma velocidade de 0,3 m/s no PH3, calculado pela Equação 3.26, confere uma vantagem, ainda que ligeira, à configuração 4: 6,3 W/m<sup>3</sup> contra os 6,5 W/m<sup>3</sup> da Geo-3.

A existência de uma melhoria nas zonas mortas à custa da mistura vertical dificulta a otimização, porque é difícil prever como irá variar a produtividade. Por exemplo, com uma redução de 5% das zonas mortas (benéfica) e uma redução de 5% da mistura vertical (prejudicial), pode não se obter a mesma produtividade da situação de referência, ainda que a variação de ambos seja de 5%. Assim, será necessário um estudo adicional para identificar o indicador mais importante para a produtividade, entre as zonas mortas e a mistura.

Atendendo à maior magnitude da diminuição da mistura vertical (32,0%), relativamente à redução das zonas mortas (28,6%), foi usada a configuração 3 no passo seguinte da otimização.

### 3.2.6 Geo-5

Procedeu-se, então ao passo 4 da otimização, com a alteração do diâmetro da roda de pás. Utiliza-se a Geo-3 como base, ou seja, um  $rdp = 0,25$  (Equação 3.22), e altera-se o  $rdp$  (Equação 3.24) para 3,25. Esta foi a primeira simulação a utilizar a segunda versão da malha. Os valores finais estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-5

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{máx}$ [m/s]	$\overline{v/V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,180	0,398	0,000	17,8	4,6
PH2	0,272	0,396	0,002	1,6	
PH3	0,333	0,516	0,007	1,2	
PV1	0,310	0,332	0,025	2,9	
PV2	0,283	0,476	-0,061	11,2	
PV3	0,294	0,454	0,001	11,7	
PV4	0,288	0,436	-0,002	10,4	
PV5	0,288	0,411	-0,003	1,1	
PV6	0,292	0,362	-0,002	0,7	
PV7	0,295	0,350	0,000	0,9	

Para as comparações serem válidas, a melhor configuração até ao momento (Geo-3) foi adaptada para a segunda versão da malha. Na Tabela 15, presente na secção 3.3, estão os resultados obtidos, e são discutidas as diferenças.

Verifica-se, relativamente à configuração 3, um aumento praticamente global das velocidades média (21,4%) e máxima (15,5%), uma manutenção ou redução da mistura vertical (destaca-se a redução de 154% no PV2), uma diminuição das zonas mortas no fundo do tanque (3,4 pontos percentuais) e o aumento de 5,1% da potência de acionamento. No entanto, comparando a potência pela Equação 3.26, de forma a obter 0,3 m/s no PH3, a Geo-5 apresenta uma clara vantagem, necessitando de apenas 3,4 W/m<sup>3</sup>, enquanto que a Geo-3 requer 6,4 W/m<sup>3</sup> (na segunda versão da malha).

### 3.2.7 Geo-6

Estudou-se mais uma possibilidade de diâmetro para a roda de pás, correspondente a um  $rdp$  de 2,5 (Equação 3.24). Os valores finais estão na Tabela 12.

Tabela 12 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-6

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{máx}$ [m/s]	$\overline{v/V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,123	0,316	-0,004	34,6	4,2
PH2	0,191	0,310	0,003	4,3	
PH3	0,243	0,409	0,009	2,2	
PV1	0,219	0,247	0,030	5,0	
PV2	0,213	0,396	0,037	16,8	
PV3	0,209	0,371	0,025	19,3	
PV4	0,203	0,351	-0,006	14,8	
PV5	0,206	0,317	-0,005	5,7	
PV6	0,212	0,275	-0,001	1,3	
PV7	0,212	0,271	0,001	1,8	

As principais alterações, em relação às Geo-3 e Geo-5, são a redução generalizada das velocidades média e máxima, e a redução na potência de acionamento (-4,3% do que a Geo-3 e -9,3% do que a Geo-5). A mistura tende a diminuir, exceto nos planos PV1, PV2 e PV3, em que aumenta, em média, 454% em relação às outras duas configurações.

A redução da potência de acionamento não é diretamente comparável, porque a velocidade produzida pela rotação das pás é, também, muito inferior. Para se obter uma velocidade média de 0,3 m/s no PH3, pela Equação 3.26, seriam necessários 8,0 W/m<sup>3</sup>, o que corresponde ao maior valor das três geometrias. Corrobora-se, assim, que a utilização de um diâmetro superior conduz a uma roda de pás de maior eficiência (Li et al. 2013).

Um estudo que complementa as simulações realizadas nesta dissertação foi o de Pirasaci et al. (2017), em que os autores pretendiam verificar experimentalmente a influência do diâmetro e do posicionamento da roda de pás, entre a sua colocação no centro do canal e imediatamente a seguir a uma das curvas. No artigo de Pirasaci et al. (2017), as velocidades são apresentadas em intervalos, mas, por conveniência, foram convertidas numa percentagem de volume morto na Tabela 13. Também são indicadas as potências consumidas ao veio, em função do volume de água no *raceway pond*.

Tabela 13 – Influência do diâmetro na percentagem de volume morto e potência consumida, para as alturas de água de 5 e 10 cm, e para rodas de pás posicionadas no centro do canal e na curva do *raceway pond*. Adaptado de Pirasaci et al. (2017)

Posição da roda de pás	Diâmetro da roda de pás	Altura de água: 5 cm		Altura de água: 10 cm	
		Volume morto ( $V < 0,1$ m/s) [%]	Potência [W/m <sup>3</sup> ]	Volume morto ( $V < 0,1$ m/s) [%]	Potência [W/m <sup>3</sup> ]
Centro	20 cm	21,6	3,10	15,0	1,00
	30 cm	16,8	10,3	6,00	7,50
Curva	20 cm	19,8	3,10	13,5	1,00
	30 cm	15,9	10,2	4,4	7,60

Colocando os valores da potência e da percentagem de volume morto da Tabela 13, em função da razão  $D/H$ , obteve-se o gráfico da Figura 16.

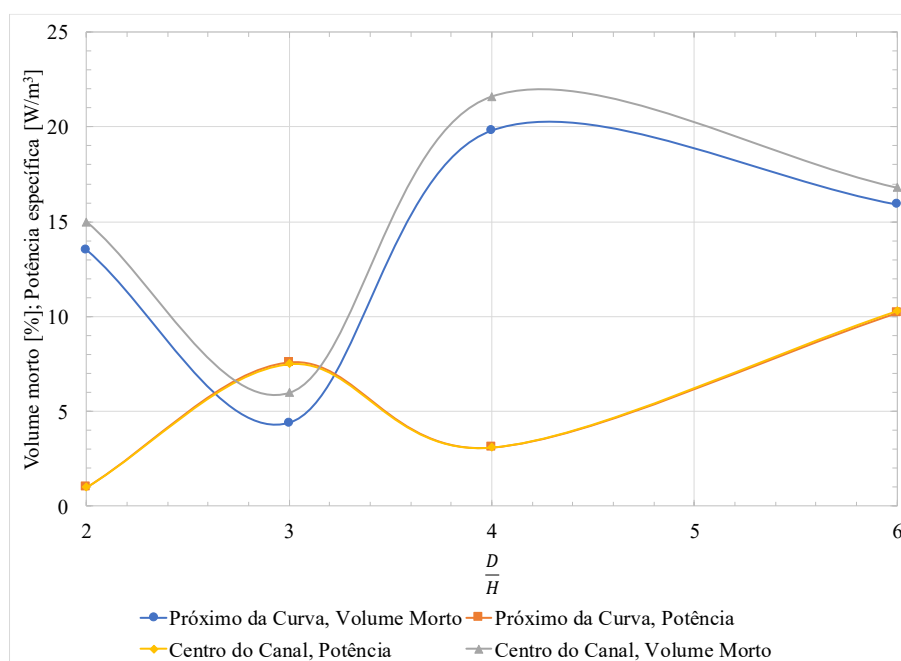


Figura 16 – Variação da percentagem de volume morto e da potência específica com a razão diâmetro por altura de água.



Pela análise do gráfico da Figura 16, verifica-se que a potência de acionamento não depende da posição da roda de pás no tanque, e que o posicionamento na proximidade da curva proporciona uma redução da percentagem de zonas mortas. Verifica-se, também, que o valor ideal de  $D/H$  é, aproximadamente, 2,65. O valor de  $D/H = 3,25$  não é o valor ótimo, porque representa uma roda com maior diâmetro e, conseqüentemente, mais dispendiosa, além de que os valores da percentagem de zonas mortas e de potência são ligeiramente superiores. No entanto, o estudo de Pirasaci et al. (2017) foi realizado na condição de que a razão entre o comprimento do *raceway* ( $W$ ) e a sua largura ( $L$ ) é igual a 2. Segundo Hadiyanto et al. (2013), “(...) um maior valor da razão  $L/W$  requer menor potência por unidade de área do que menores  $L/W$ .” e que “(...) desenhar um tanque com maior razão  $L/W$  é mais vantajoso.”. Assim, os valores ótimos encontrados para este caso não serão os mesmos quando se altera a razão  $L/W$ , que, também segundo Hadiyanto et al. (2013), deve ser superior a 10.

Nas simulações deste trabalho, em que a razão  $L/W = 5$ , verificou-se que um  $D/H = 3,25$  (Geo-5) é preferível a 2,833 (Geo-3) e a 2,5 (Geo-6), do ponto de vista energético e das zonas mortas, mas recomenda-se a realização de um estudo experimental para aferir a influência da redução da mistura na produtividade e no retorno económico.

### 3.2.8 Geo-7

Passou-se, então, ao último passo do procedimento de otimização, com a alteração do número de pás da roda, usando, como base, o diâmetro da roda na Geo-5 ( $D/H = 3,25$ ). O número de pás foi reduzido de 8 para 4. Os valores obtidos estão na Tabela 14.

Tabela 14 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-7

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{máx}$ [m/s]	$\overline{v/V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,173	0,385	-0,003	20,4	3,4
PH2	0,262	0,382	0,002	1,7	
PH3	0,321	0,482	0,006	1,2	
PV1	0,302	0,330	0,029	3,2	
PV2	0,280	0,467	-0,063	7,5	
PV3	0,288	0,447	0,015	9,7	
PV4	0,281	0,435	-0,002	10,8	
PV5	0,280	0,410	-0,004	1,8	
PV6	0,282	0,355	-0,001	0,8	
PV7	0,283	0,341	0,000	1,1	

A redução do número de pás de 8 para 4 resultou na diminuição global das velocidades média e máxima, na ordem dos 2,5%, e na redução de 26% da potência de acionamento. A mistura vertical apresentou pequenas variações, destacando-se a redução no PH1 e o aumento no PV3. Comparando, pela Equação 3.26, a potência necessária para se ter uma velocidade média de 0,3 m/s no PH3, conclui-se que a configuração 7 é a melhor, por necessitar de apenas 2,8 W/m<sup>3</sup>, enquanto que as 8 pás requerem 3,4 W/m<sup>3</sup>.

A diminuição do número de pás afetará, sobretudo, a componente motora, devido à maior amplitude na curva de binário: 1,8 Nm com 8 pás, contra os 3,5 Nm das 4 pás (Figura 17). Assim, será necessário usar equipamentos mais robustos, aumentando o custo de aquisição.

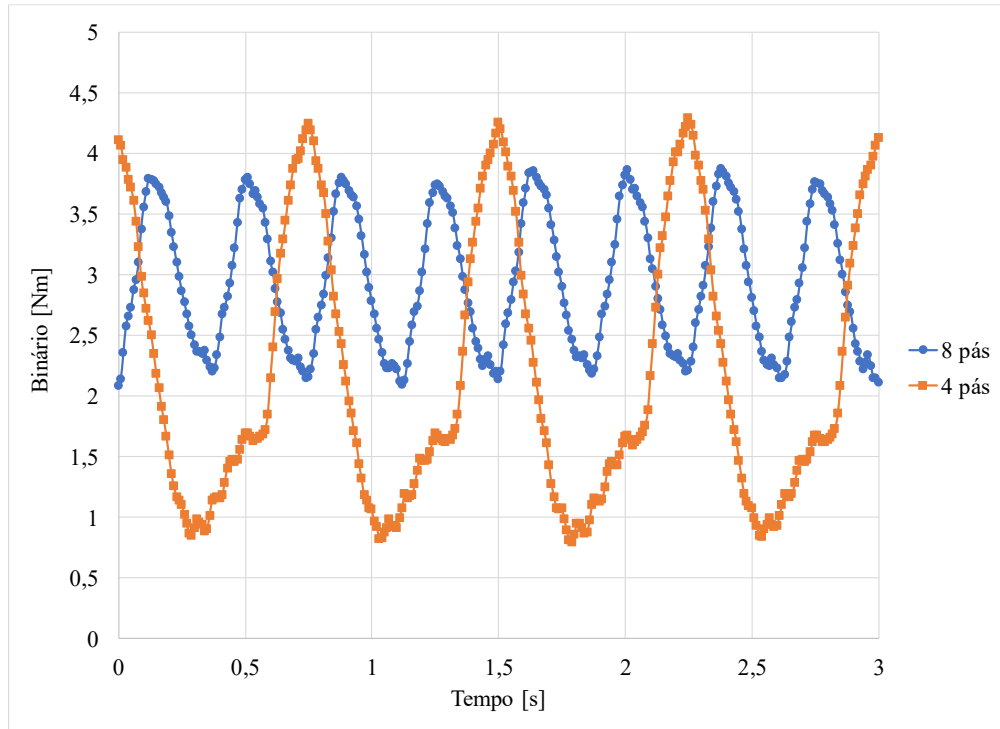


Figura 17 – Variação do binário no tempo, para uma roda com 4 e 8 pás, ao longo de um período.

### 3.2.9 Forma das pás

Partindo dos dados de Li et al. (2013), fazendo uma análise adimensional pela Expressão 3.27, verifica-se que, para cada profundidade e forma da pá, a curva da velocidade em função da velocidade de rotação tem um valor essencialmente constante. Traçando uma curva em função de  $D/H$ , obtém-se o gráfico da Figura 18.

$$\frac{60V}{nD} \quad (3.27)$$

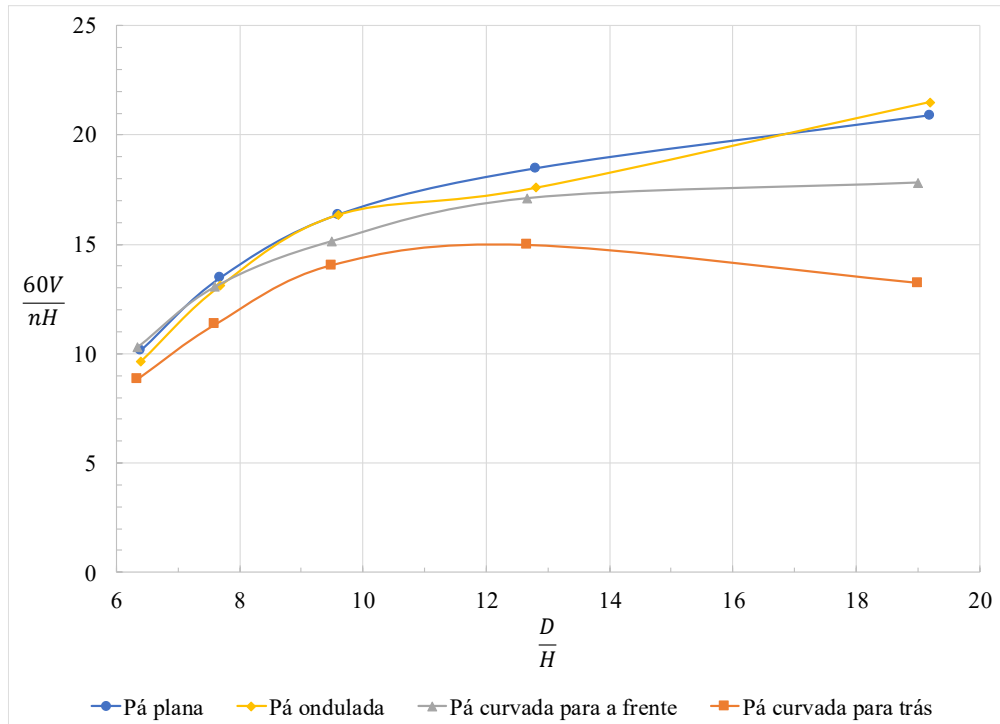


Figura 18 – Variação da velocidade do fluido com a forma da pá e o seu diâmetro.

Pelo gráfico da Figura 18, verifica-se que as pás planas, para a mesma velocidade de rotação e razão  $D/H$ , proporcionam maior velocidade ao fluido, o que atesta a maior eficiência das pás planas (Li et al. 2013). Os valores de  $D/H$  são muito elevados, correspondendo a rodas com um diâmetro muito superior à altura da água, o que é prática comum em *raceways* para microalgas, consequência da baixa profundidade da água. As gamas de  $D/H$  em que as pás onduladas e curvadas para a frente aparentam ser vantajosas contrapõem a maior tendência destas formas em reter algas, rapidamente as colocando em desvantagem.

### 3.3 Comparação entre malhas

Atendendo à mudança na formulação da malha computacional, e da necessidade de se fazerem comparações com a Geo-3, cujos resultados na primeira formulação foram apresentados na Tabela 8, recalcularam-se os indicadores na nova malha (Tabela 15).

Tabela 15 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-3, usando a segunda versão da malha computacional

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{máx}$ [m/s]	$\overline{v/V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,152	0,333	-0,011	21,2	4,4
PH2	0,224	0,337	0,003	2,5	
PH3	0,265	0,485	0,007	1,5	
PV1	0,260	0,292	0,027	2,2	
PV2	0,253	0,482	-0,024	18,9	
PV3	0,236	0,410	0,008	16,5	
PV4	0,233	0,373	-0,006	11,1	
PV5	0,235	0,321	-0,004	1,5	
PV6	0,239	0,289	0,000	0,9	
PV7	0,237	0,285	0,001	1,8	

As principais diferenças verificadas nesta mudança foram:

- Redução de 29,5% da velocidade média e aumento de 18,5 pontos percentuais das zonas mortas no PH1;
- Aumento, em média, de 3,2% da velocidade máxima;
- Redução da mistura vertical no PH1 (514%) e no PV1 (40,3%), e uma inversão de sentido no PV2 e PV3.
- Pequena diminuição da potência de acionamento (0,4%).

As alterações dos indicadores no PH1 resultam, sobretudo, da diferenciação em relação ao PH2, por serem idênticos na primeira versão. Com os resultados anteriores, poderia pensar-se que a camada limite já tinha terminado no PH1, o que não corresponde à realidade, segundo indicaram os contornos de  $du/dy$  e da viscosidade turbulenta na validação do modelo.

A inversão do sentido da mistura vertical no PV2 e PV3 motivou a comparação entre malhas noutra geometria, uma vez que no primeiro plano passou de positivo a negativo e no segundo de negativo a positivo. Aplicando, então, a segunda versão da malha à Geo-2, obtiveram-se os resultados da Tabela 16. Comparando com a Tabela 7, onde estão os dados na primeira versão da malha, verifica-se que existe um comportamento idêntico ao encontrado na Geo-3, exceto a mistura vertical. Nos planos PV2 e PV3 da Geo-2, dá-se uma inversão do sentido negativo para positivo. A discordância entre as duas geometrias pode ser causada por uma periodicidade neste parâmetro, que não foi avaliada no decorrer das simulações, pela

solução não ser independente da malha ou por não haver conservação da quantidade de movimento nas interfaces (consultar secção 3.1).

Tabela 16 – Velocidade média, máxima, mistura vertical, zonas mortas e potência de acionamento na Geo-2, usando a segunda versão da malha computacional

Plano	$\bar{V}$ [m/s]	$\bar{V}_{máx}$ [m/s]	$\bar{v}/\bar{V}$ [-]	Zonas Mortas [%]	$P$ [W/m <sup>3</sup> ]
PH1	0,165	0,351	0,000	18,6	5,8
PH2	0,239	0,386	0,003	2,7	
PH3	0,285	0,523	0,007	1,6	
PV1	0,278	0,308	0,046	2,1	
PV2	0,245	0,517	0,010	20,2	
PV3	0,245	0,446	0,005	17,0	
PV4	0,244	0,411	-0,009	13,8	
PV5	0,249	0,351	-0,005	1,7	
PV6	0,258	0,312	-0,001	0,9	
PV7	0,258	0,310	0,001	1,5	

Nos planos verticais mais afastados da roda, as alterações são pequenas em todos os indicadores, indicando uma menor dependência da resolução da malha nestas zonas, possivelmente devido à menor turbulência no escoamento.

No Anexo B apresenta-se, por via gráfica, a comparação entre as malhas, ao nível da velocidade média, máxima, mistura vertical e zonas mortas.

### 3.4 Sumário das configurações

Para ajudar a compreensão das mudanças em cada geometria, apresenta-se, na Tabela 17, um resumo dos parâmetros em estudo.

Tabela 17 – Parâmetros usados na definição de cada geometria

Geometria	Número de pás	$rdf = \frac{d}{H}$	$rdl = \frac{l_c - l_p}{l_c}$	$rdp = \frac{D}{H}$
Referência	8	0,2	0,86	2,833
Geo-1	8	0,133	0,86	2,833
Geo-2	8	0,167	0,86	2,833
Geo-3	8	0,25	0,86	2,833
Geo-4	8	0,25	0,914	2,833
Geo-5	8	0,25	0,86	3,25
Geo-6	8	0,25	0,86	2,5
Geo-7	4	0,25	0,86	3,25

Comparando a configuração de partida (Referência) à otimizada (Geo-7), obteve-se uma diminuição da potência de acionamento de 6,0 W/m<sup>3</sup> para 3,4 W/m<sup>3</sup>, enquanto que para movimentar a água a 0,3 m/s no PH3, tem-se uma redução de 8,1 W/m<sup>3</sup> para 2,8 W/m<sup>3</sup>. Comparando a potência por unidade de área de superfície (em contacto com a atmosfera), tem-se uma redução de 0,9 W/m<sup>2</sup> para 0,5 W/m<sup>2</sup>, o que continua a situar-se na zona superior da literatura (Prussi et al. 2014 e Rogers et al. 2014). No entanto, a potência por unidade de volume ultrapassou o patamar inferior de 4 W/m<sup>3</sup>, relatado por Kumar et al. (2015).

Relativamente às zonas mortas, as duas versões da malha tendem a apresentar valores semelhantes, exceto no PH1, pelo que é possível comparar este indicador fora deste plano. A utilização da Geo-7, em detrimento da Referência, confere uma redução das zonas mortas nos PH2, PH3, PV2 e PV3, possivelmente ainda no PV4.

Quanto à mistura, é imprudente comparar diretamente as duas configurações, atendendo à variabilidade deste indicador entre as malhas. Uma alternativa ainda não explorada é a velocidade ao entrar nas curvas do *raceway pond*, que é o local onde ocorre a maior parte deste fenómeno (Prussi et al. 2014), podendo ser estimada pela velocidade no plano mais distante da roda (PV7). Uma vez que, neste plano, a diferença das velocidades entre as malhas é de apenas 1,2%, as grandezas podem ser comparadas sem um erro significativo. Assim, estando a roda a girar à mesma frequência, a Geo-7 proporciona valores de velocidade superiores em 0,04 m/s, pelo que haverá melhor mistura vertical nas curvas.

Nas Figuras 19 a 22 são apresentados gráficos entre a Referência e a Geo-7, salientando a otimização efetuada neste trabalho.

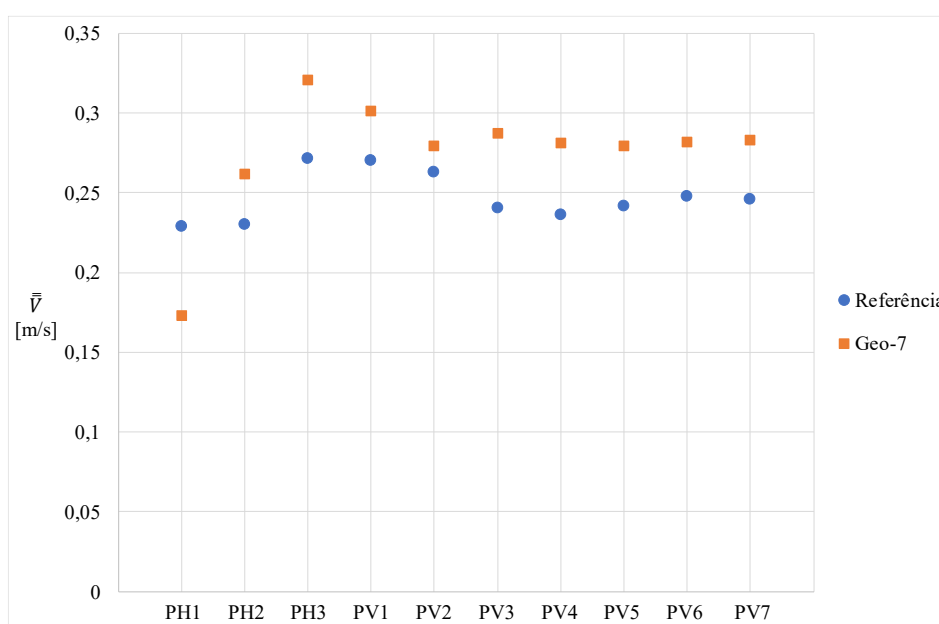


Figura 19 – Comparação da velocidade média entre a geometria inicial (Referência) e a otimizada (Geo-7).

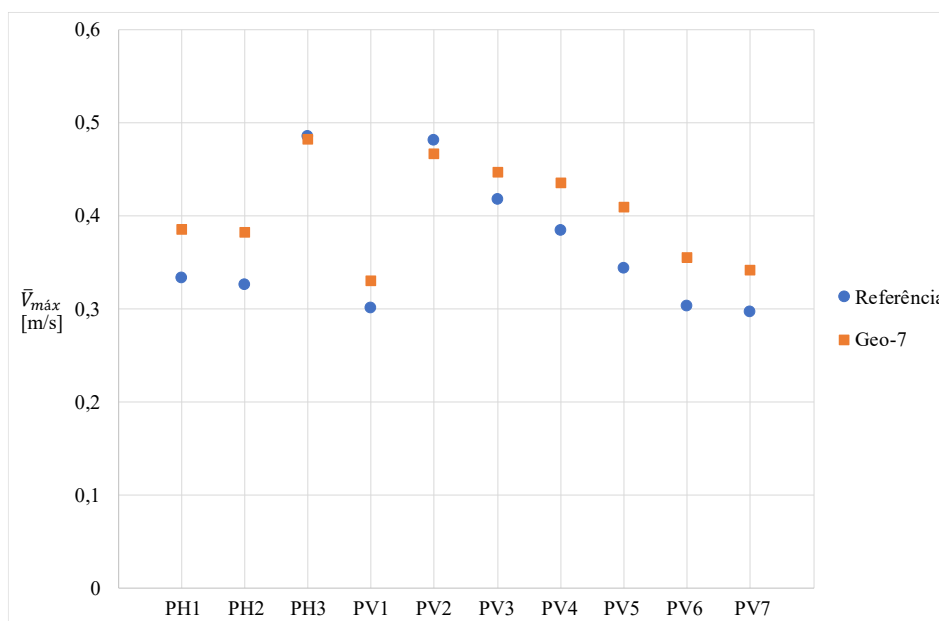


Figura 20 – Comparação da velocidade máxima entre a geometria inicial (Referência) e a otimizada (Geo-7).

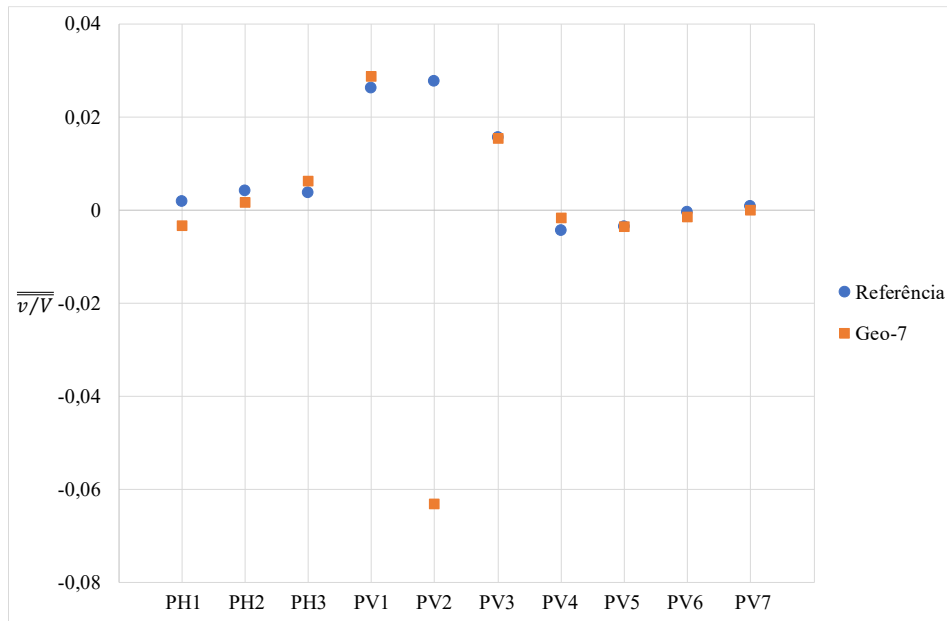


Figura 21 – Comparação da mistura vertical entre a geometria inicial (Referência) e a otimizada (Geo-7).

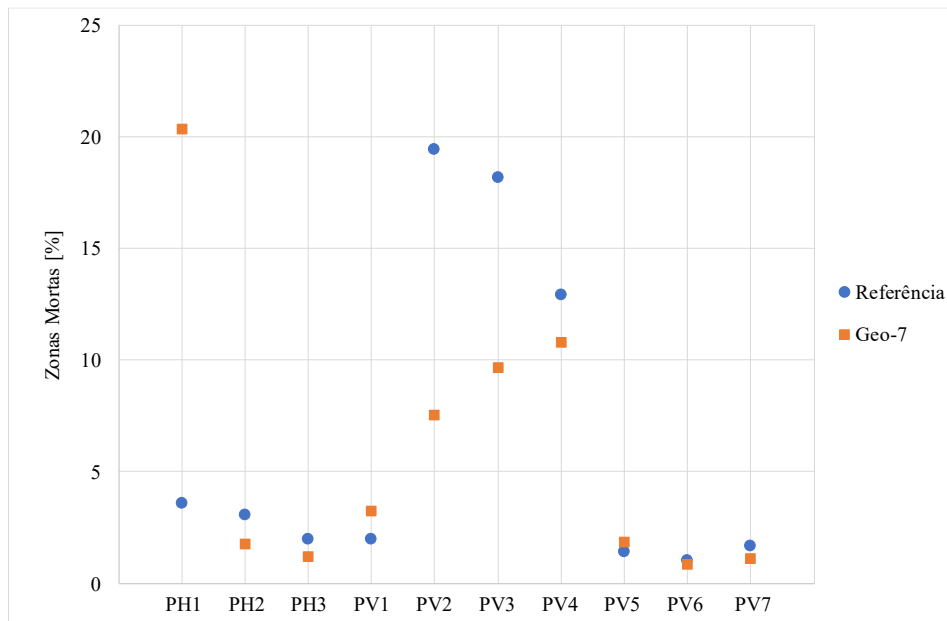


Figura 22 – Comparação da percentagem de zonas mortas entre a geometria inicial (Referência) e a otimizada (Geo-7).

## 4 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

Nesta secção resumem-se as principais conclusões e propõem-se matérias para investigação futura.

### 4.1 Conclusões

A utilização de *raceway ponds* para cultivar macroalgas apresenta grandes desafios na redução de custos, pelas necessidades deste organismo aquático e complexidade do escoamento gerado pela rotação de uma roda de pás. Para aprofundar o conhecimento no dimensionamento de uma roda de pás, realizou-se um estudo numérico e avaliaram-se a influência do seu posicionamento vertical, da largura, da forma e do número de pás, assim como do diâmetro no consumo de energia e na produtividade.

A utilização da técnica da malha deslizante permite obter resultados em conformidade com medições experimentais, e constitui uma plataforma adequada para estudar variações de geometria. Após uma revisão na definição da malha, motivada por problemas de convergência, constatou-se que continuava a existir dependência na solução. O indicador da mistura vertical apresentou um comportamento díspar nas geometrias resolvidas com as duas malhas, por existirem inversões no sentido do escoamento na direção vertical. Além da dependência da malha, é possível que a solução esteja a ser afetada por um acoplamento deficiente entre os subdomínios, nomeadamente com a redução abrupta da componente vertical da velocidade na interface entre a zona de malha deslizante e o canal.

A configuração otimizada consiste numa roda com 4 pás planas, uma distância entre as pás e o fundo do *raceway* correspondente a 25% da altura de água, varrendo 86% da largura dos canais e com um diâmetro equivalente a 3,25 vezes a altura de água.

A relação entre a distância livre das pás ao fundo do *raceway* e os indicadores de produtividade é não-linear, sobretudo na mistura vertical, pela dificuldade de prever a sua tendência. O posicionamento da roda a uma cota mais elevada proporciona: aumento das zonas mortas, na maioria das localizações; diminuição das velocidades média e máxima; redução da potência de acionamento. A não-linearidade da mistura concedeu os melhores indicadores à configuração mais afastada do fundo, sendo a eleita para o seguimento da otimização.

A jusante da roda, na imediação das paredes laterais, verificou-se que existia um grande volume a circular a baixa velocidade. Com a transição de uma largura de pás de 86% para 91% da largura do canal, obteve-se a redução desta zona, à custa de um aumento de 7,1% da potência de acionamento e da redução da mistura vertical. Ainda assim, o incremento da velocidade do escoamento favoreceu as pás de maior largura na energia consumida para se obter uma velocidade de 0,3 m/s, com uma diminuição de 2,9%. Apesar de ser difícil prever qual o fator mais importante para a produtividade, entre a mistura vertical e as zonas mortas, foi preferida a configuração de menor largura, por ter a melhor mistura.

O diâmetro da roda ( $D$ ) foi estudado em função da altura de água nos canais ( $H$ ), e verificou-se que este não é generalizável, por depender da razão entre o comprimento do *raceway* e a sua largura ( $L/W$ ). Numa análise de dados presentes na literatura, para  $L/W = 2$ , tem-se o valor ótimo de  $D/H = 2,65$ . No caso estudado, com um  $L/W = 5$ , adotando o critério de minimização do consumo de energia, o valor ótimo é  $D/H = 3,25$ , o que permitiu, ainda, uma diminuição das zonas mortas. No entanto, uma redução na mistura vertical coloca reservas nesta opção, pois a produtividade pode estar a ser comprometida à custa de um consumo de energia, que no global afeta o retorno económico do cultivo das algas.

A utilização de 4 pás, ao invés de 8, conferiu uma diminuição de 26% no consumo de energia, sem afetar de forma significativa os outros indicadores da produtividade, revelando-se a melhor escolha entre estes dois números. A redução do número de pás aumentou a amplitude das oscilações do binário praticamente para o dobro, pelo que se tem um maior nível de vibrações no sistema motor.

Relativamente à forma das pás, com uma análise adimensional de dados da bibliografia, verificou-se que, para uma dada velocidade de rotação e altura de água, as pás planas produzem a maior velocidade no escoamento numa gama alargada de diâmetros. As pás onduladas e curvadas para a frente conferem pequenas vantagens em alguns diâmetros, mas a maior complexidade da sua forma potencia a retenção e adesão das algas, prejudicando o seu desempenho.

Comparando a situação inicial com a configuração otimizada, reduziu-se o consumo de energia de  $6,0 \text{ W/m}^3$  para  $3,4 \text{ W/m}^3$ , o que corresponde uma poupança de 43%, deu-se uma redução de 2,6 pontos percentuais de zonas mortas, manteve-se o nível de mistura vertical e a velocidade do escoamento aumentou 14,7%.

## 4.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, recomenda-se a identificação do indicador mais importante para a produtividade, entre as zonas mortas e a mistura. Esta necessidade deve-se à existência de configurações que originam uma redução simultânea das zonas mortas e da mistura vertical. Estes indicadores medem grandezas com efeitos opostos na produtividade e, por isso, uma redução de 5% das zonas mortas (benéfica) e uma redução de 5% da mistura vertical (prejudicial) pode não corresponder à mesma produtividade de uma situação de referência, ainda que a variação de ambos seja de 5%.

É necessário um estudo adicional do diâmetro da roda de pás, pelo contraste entre as zonas mortas e a mistura vertical, assim como pela dependência da razão  $L/W$  no valor ótimo.

Também é importante aprofundar o estudo do número de pás, porque, apesar de se ter encontrado uma configuração superior, é possível que haja um número diferente ainda mais vantajoso.



## Referências

- Amini, Hossein, Abolhasan Hashemisohi, Lijun Wang, Abolghasem Shahbazi, Marwan Bikdash, Dukka KC, e Wenqiao Yuan. 2016. «Numerical and experimental investigation of hydrodynamics and light transfer in open raceway ponds at various algal cell concentrations and medium depths». *Chemical Engineering Science* 156 (Dezembro): 11–23. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2016.09.003>.
- ANSYS Inc. 2016. «Advanced Techniques in ANSYS Meshing». 2016. [https://www.padtinc.com/blog/wp-content/uploads/2017/04/Advanced-Techniques-in-ANSYS-Meshing\\_Blog.pdf](https://www.padtinc.com/blog/wp-content/uploads/2017/04/Advanced-Techniques-in-ANSYS-Meshing_Blog.pdf).
- . 2019. «ANSYS Help». 2019. <https://ansyshelp.ansys.com/>.
- GENIALG. 2019. «Project Overview - GENIALG». 2019. <https://genialgproject.eu/about/project-overview/>.
- Hadiyanto, H., Steven Elmore, Tom Van Gerven, e Andrzej Stankiewicz. 2013. «Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design». *Chemical Engineering Journal* 217 (Fevereiro): 231–39. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2012.12.015>.
- Hreiz, Rainier, Bruno Sialve, Jérôme Morchain, Renaud Escudié, Jean-Philippe Steyer, e Pascal Guiraud. 2014. «Experimental and numerical investigation of hydrodynamics in raceway reactors used for algaculture». *Chemical Engineering Journal* 250 (Agosto): 230–39. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2014.03.027>.
- Huang, Jianke, Xiaoxing Qu, Minxi Wan, Jiangguo Ying, Yuanguang Li, Faoshao Zhu, Jun Wang, Guomin Shen, Jianpei Chen, e Wei Li. 2015. «Investigation on the performance of raceway ponds with internal structures by the means of CFD simulations and experiments». *Algal Research* 10 (Julho): 64–71. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2015.04.012>.
- INEGI. 2019. «Standing point and doubts’ session». Reunião semanal entre o INEGI e a ALGApplus, em Aveiro.
- Kumar, Kanhaiya, Sanjiv K. Mishra, Anupama Shrivastav, Min S. Park, e Ji-Won Yang. 2015. «Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (Novembro): 875–85. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.06.033>.
- Li, Yanxi, Qinghua Zhang, Zhihui Wang, Xia Wu, e Wei Cong. 2013. «Evaluation of power consumption of paddle wheel in an open raceway pond». *Bioprocess and biosystems engineering* 37 (7): 1325–36. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1103-3>.
- Liffman, Kurt, David A. Paterson, Petar Liovic, e Pratish Bandopadhyay. 2013. «Comparing the energy efficiency of different high rate algal raceway pond designs using computational fluid dynamics». *Chemical Engineering Research and Design* 91 (2): 221–26. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2012.08.007>.
- MIT. 2005. «Structured vs. Unstructured Grids». 2005. [https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-100-aerodynamics-fall-2005/lecture-notes/16100lecture48\\_cj.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-100-aerodynamics-fall-2005/lecture-notes/16100lecture48_cj.pdf).
- Munson, Bruce R., Donald F. Young, Theodore H. Okiishi, e Wade W. Huebsch. 2009. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 6.<sup>a</sup> ed. Wiley.
- Pirasaci, Tolga, Ahmet Y. Manisali, Ioannis Dogaris, George Philippidis, e Aydin K. Sunol. 2017. «Hydrodynamic design of an enclosed Horizontal BioReactor (HBR) for algae cultivation». *Algal Research* 28 (Dezembro): 57–65.

<https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2017.10.009>.

- Prussi, Matteo, Marco Buffi, David Casini, David Chiaramonti, Francesco Martelli, Mauro Carnevale, Mario R. Tredici, e Liliana Rodolfi. 2014. «Experimental and numerical investigations of mixing in raceway ponds for algae cultivation». *Biomass and Bioenergy* 67 (Agosto): 390–400. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2014.05.024>.
- Prussi, Matteo, David Casini, Mario R. Tredici, Liliana Rodolfi, Niccolò Bassi, Graziella Chini Zittelli, e Paolo Bondioli. 2013. «Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible». *Applied Energy* 102 (Fevereiro): 101–11. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.07.040>.
- Rogers, Jonathan N., Julian N. Rosenberg, Bernardo J. Guzman, Victor H. Oh, Luz Elena Mimbela, Abbas Ghassemi, Michael J. Betenbaugh, George A. Oyler, e Marc D. Donohue. 2014. «A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales». *Algal Research* 4 (Abril): 76–88. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2013.11.007>.
- Sompech, Kawisra, Yusuf Chisti, e Thongchai Srinophakun. 2012. «Design of raceway ponds for producing microalgae». *Biofuels* 3 (Julho): 387–97. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.39>.
- Sudhakar, K., R. Mamat, M. Samykano, W.H. Azmi, W.F.W. Ishak, e Talal Yusaf. 2018. «An overview of marine macroalgae as bioresource». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91 (Agosto): 165–79. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.100>.
- White, Frank M. 1974. *Viscous Fluid Flow*. 2.<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill.

## Anexo A Gráficos de resultados

Neste anexo, faz-se a análise de resultados por via gráfica. Cada parâmetro subdivide-se em quatro gráficos: velocidade média, velocidade máxima, mistura vertical e zonas mortas.

### Razão de distância ao fundo (*rdf*)

A redução do espaçamento livre entre a pá e o fundo do *raceway* proporciona um aumento da velocidade média (Figura A-1) e tende a aumentar a velocidade máxima (Figura A-2), reduzir a mistura (Figura A-3) e as zonas mortas (Figura A-4).

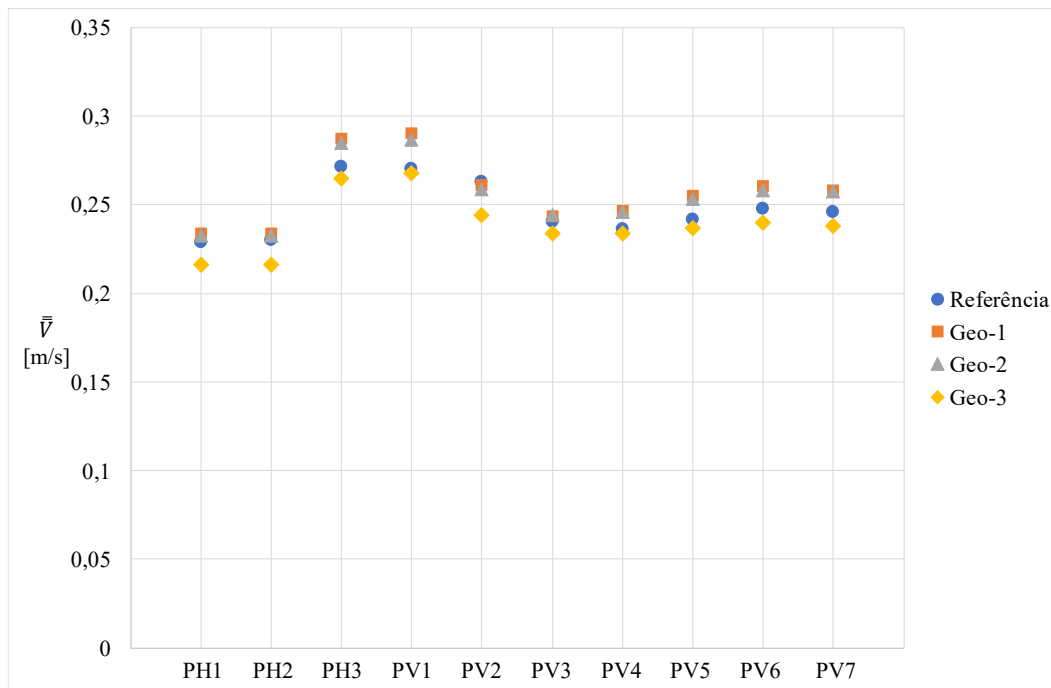


Figura A-1 – Velocidade média em função de *rdf*.

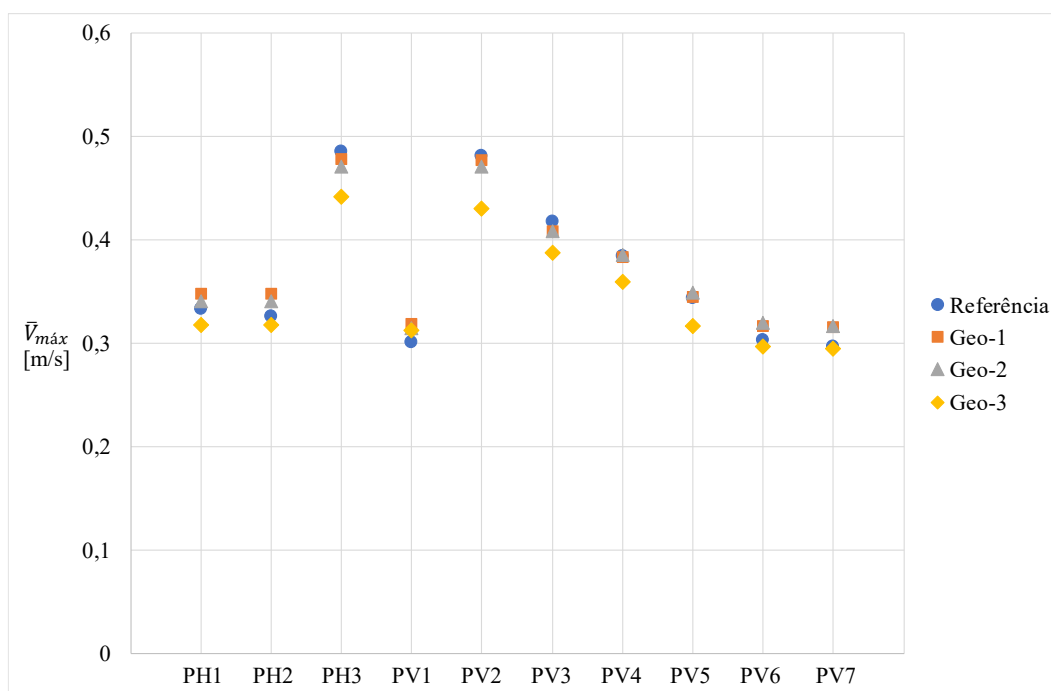


Figura A-2 – Velocidade máxima em função de *rdf*.

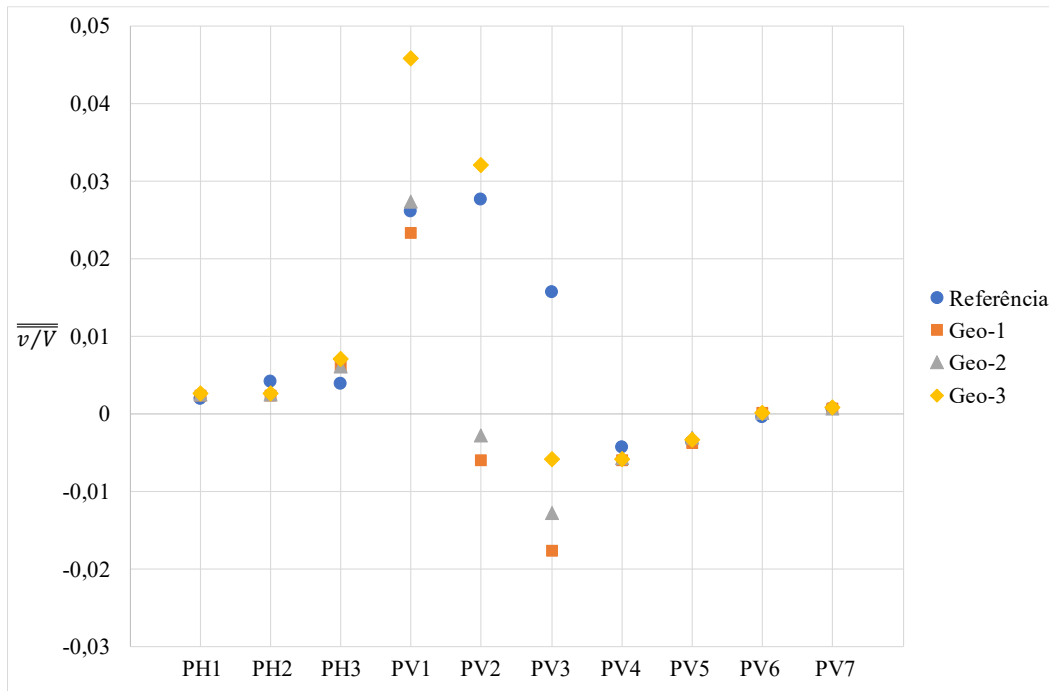


Figura A-3 – Mistura vertical em função de  $rdf$ .

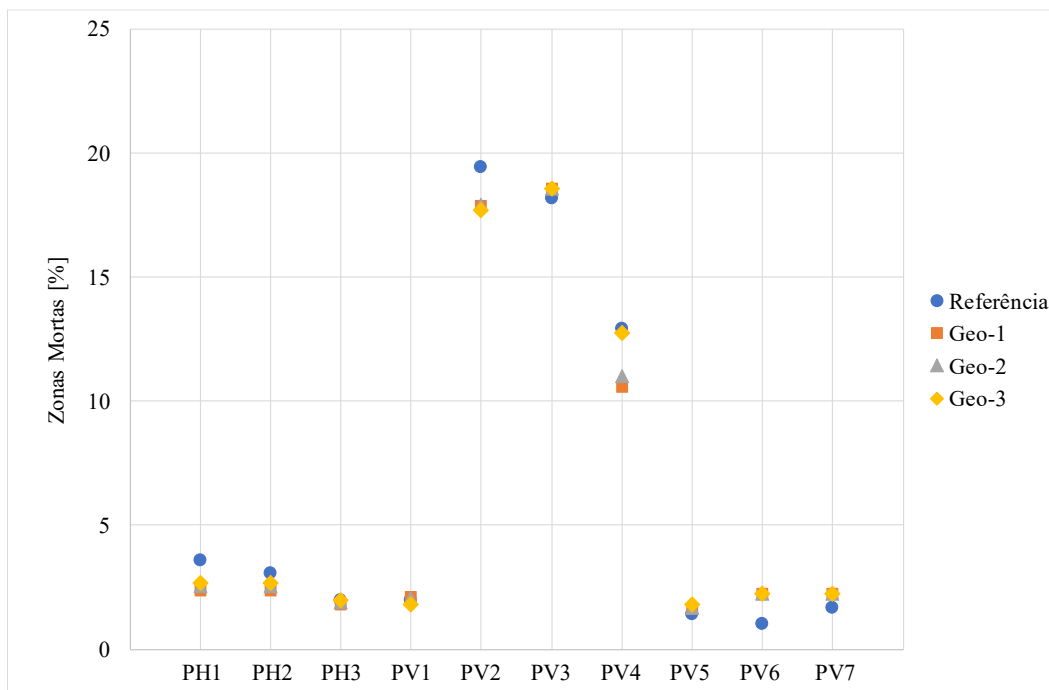


Figura A-4 – Zonas mortas em função de  $rdf$ .

### Razão de distância lateral ( $r_{dl}$ )

O aumento da largura das pás provocou o aumento da velocidade média (Figura A-5) e redução da velocidade máxima (Figura A-6), conferindo um melhor controle do escoamento. O propósito da Geo-4 era reduzir as zonas mortas, o que foi atingido (Figura A-8), mas a redução na mistura (Figura A-7) impossibilita a declaração de qual é a melhor configuração, por ambos condicionarem a produtividade.

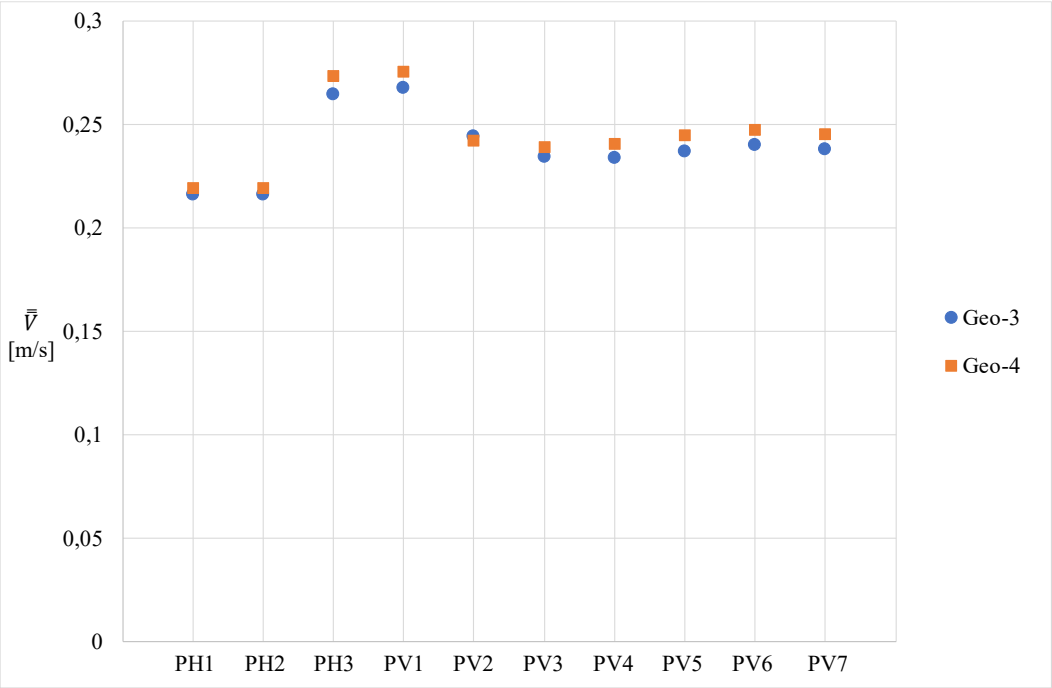


Figura A-5 – Velocidade média em função de  $rdl$ .

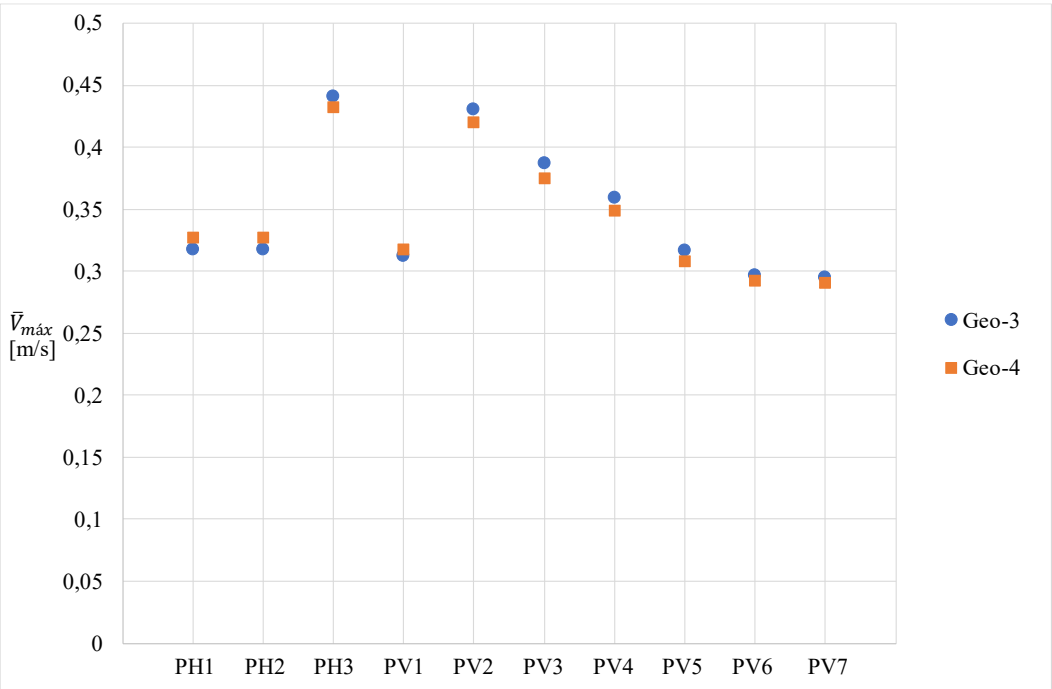


Figura A-6 – Velocidade máxima em função de  $rdl$ .

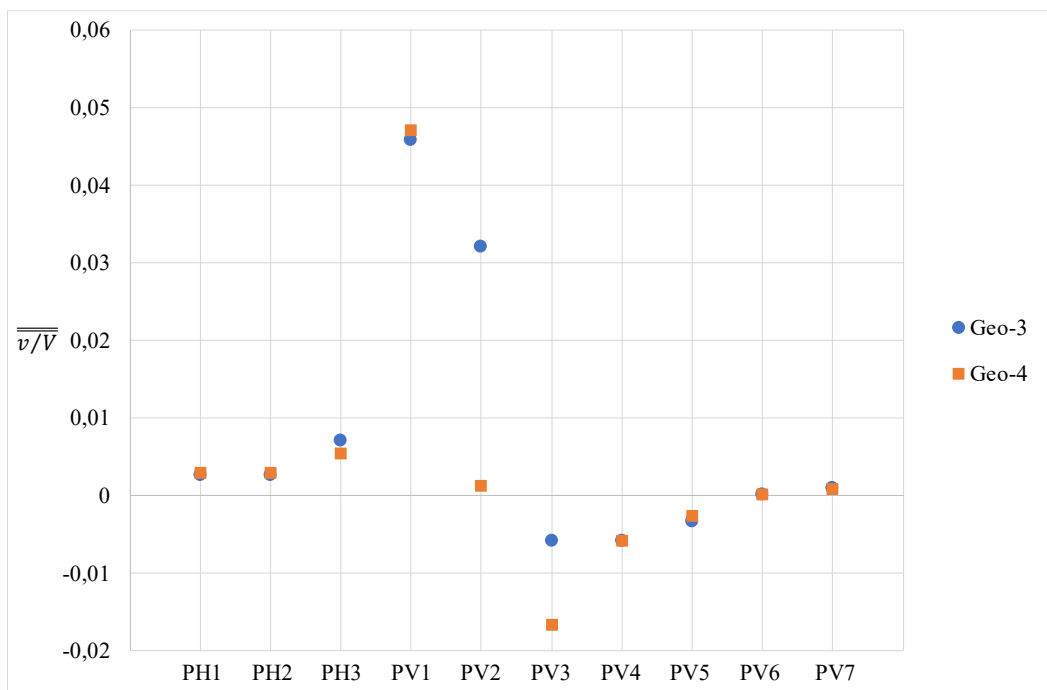


Figura A-7 – Mistura vertical em função de  $rdl$ .

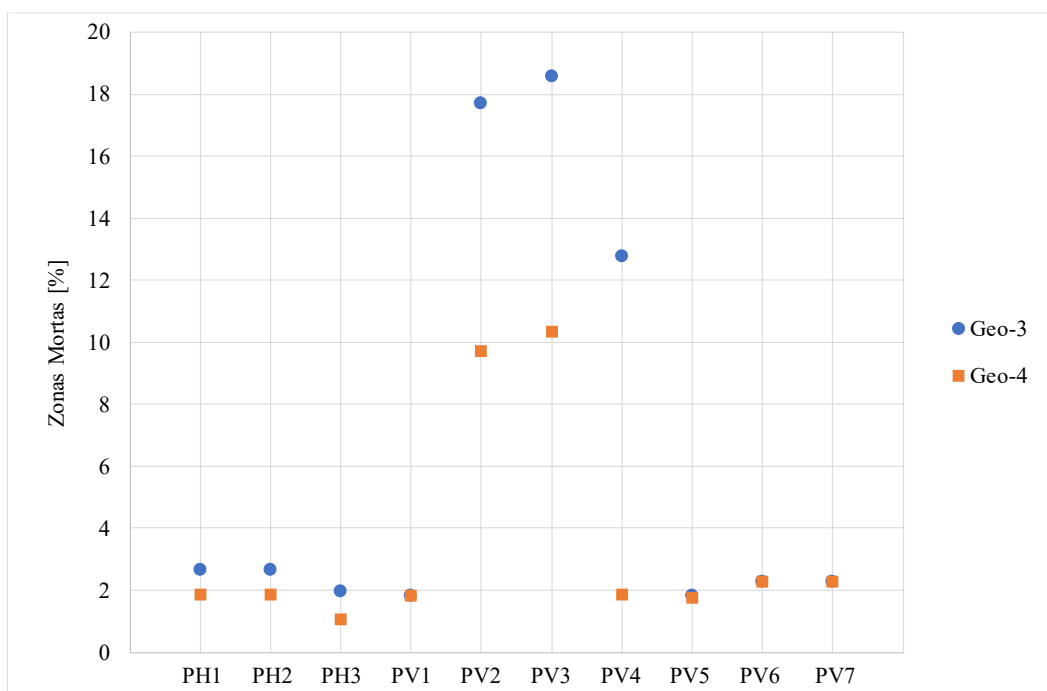


Figura A-8 – Zonas mortas em função de  $rdl$ .

### Razão do diâmetro pela profundidade ( $rdp$ )

A utilização de um diâmetro maior da roda de pás provoca o crescimento das velocidades média e máxima (Figuras A-9 e A-10); a mistura vertical aumenta no PH1 e nos planos mais afastados da roda, mas diminui nos PV2 e PV3 (Figura A-11). As percentagens de zonas mortas diminuem com o diâmetro (Figura A-12). Os valores da Geo-3 correspondem aos obtidos na segunda versão da malha.

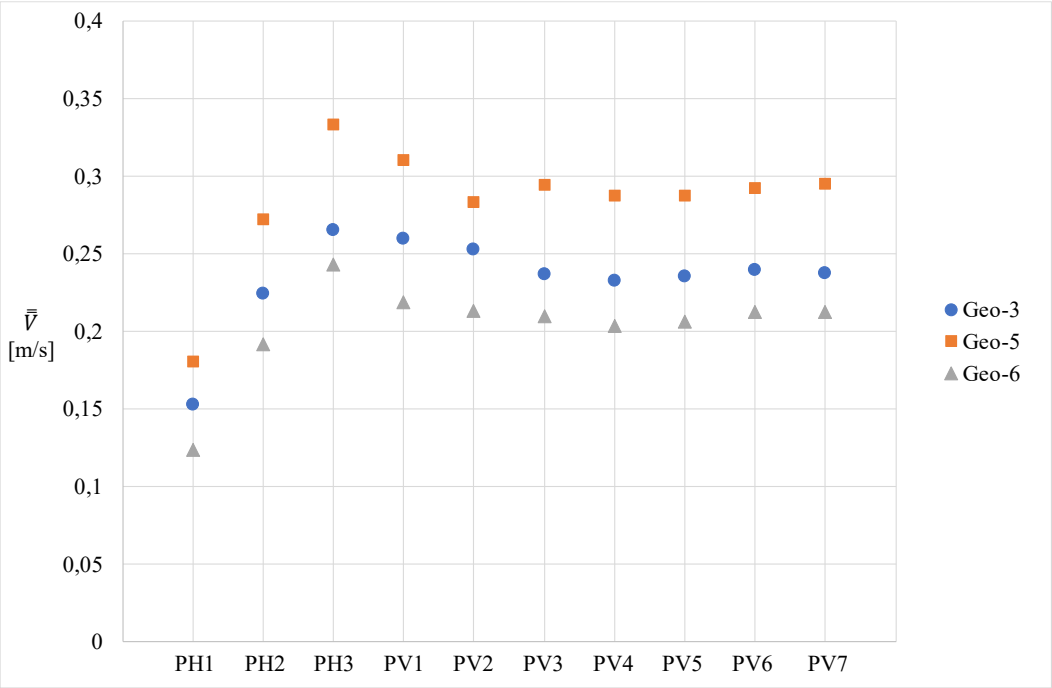


Figura A-9 – Velocidade média em função de  $rdp$ .

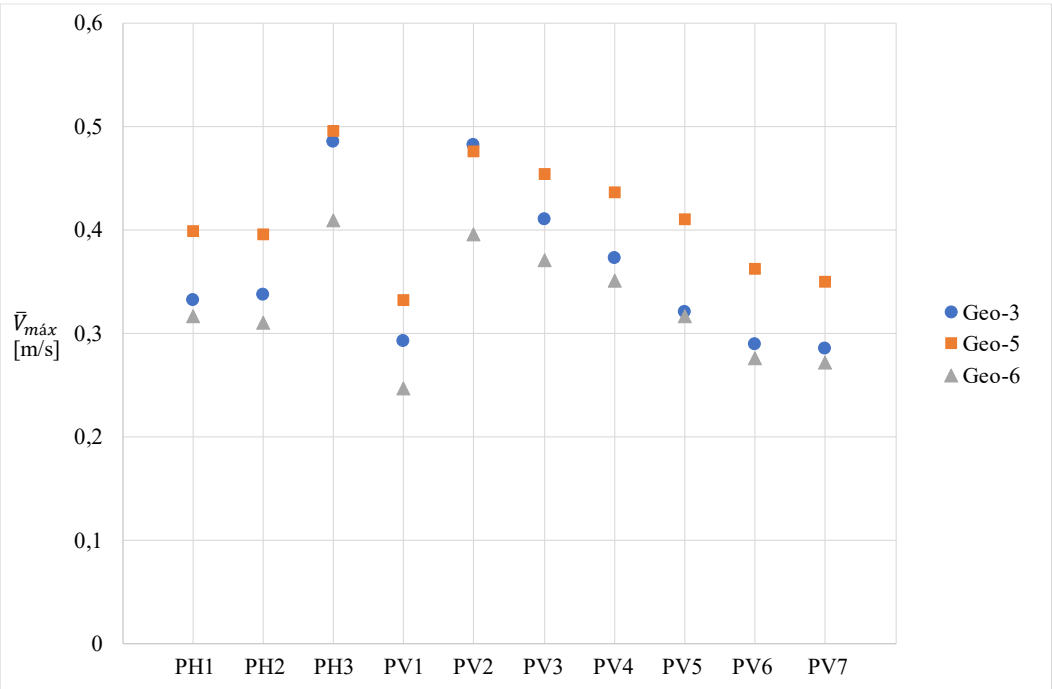


Figura A-10 – Velocidade máxima em função de  $rdp$ .

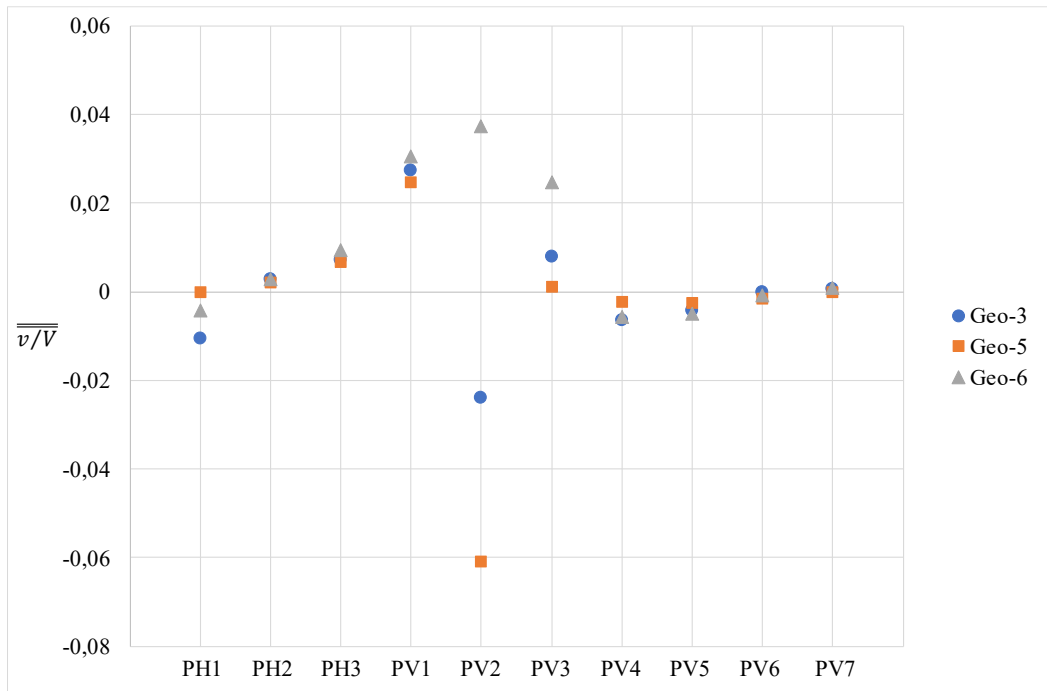


Figura A-11 – Mistura vertical em função de *rdp*.

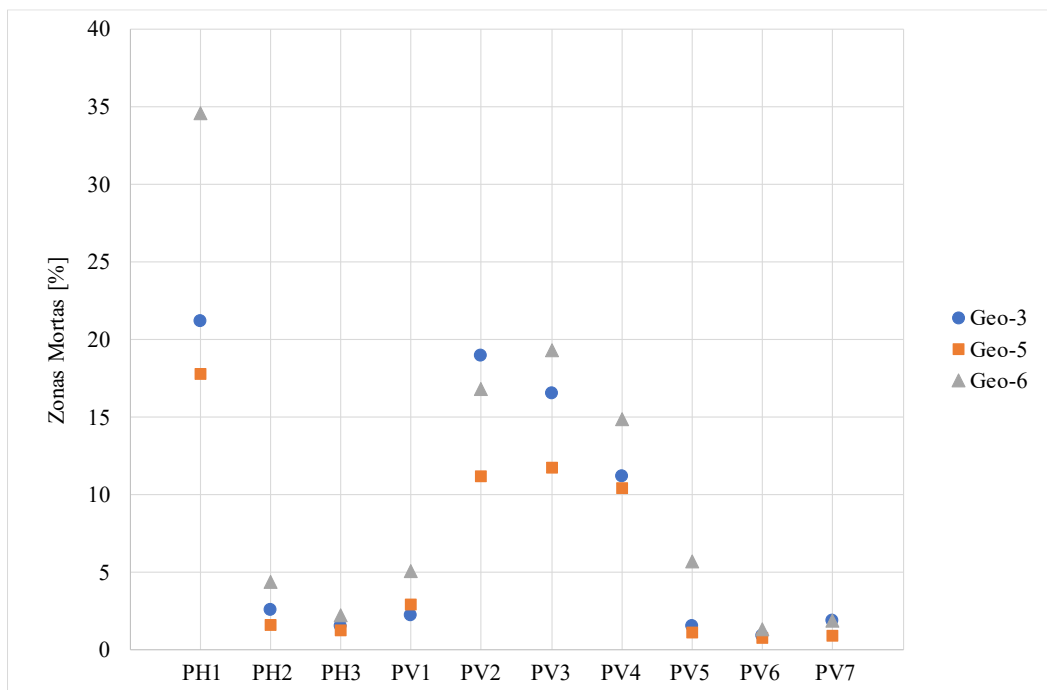


Figura A-12 – Zonas mortas em função de *rdp*.

## Número de pás

A redução de 8 para 4 pás provocou uma pequena redução nas velocidades (Figuras A-13 e A-14), mas a mistura (Figura A-15) e as zonas mortas (Figura A-16) exibem uma melhoria.



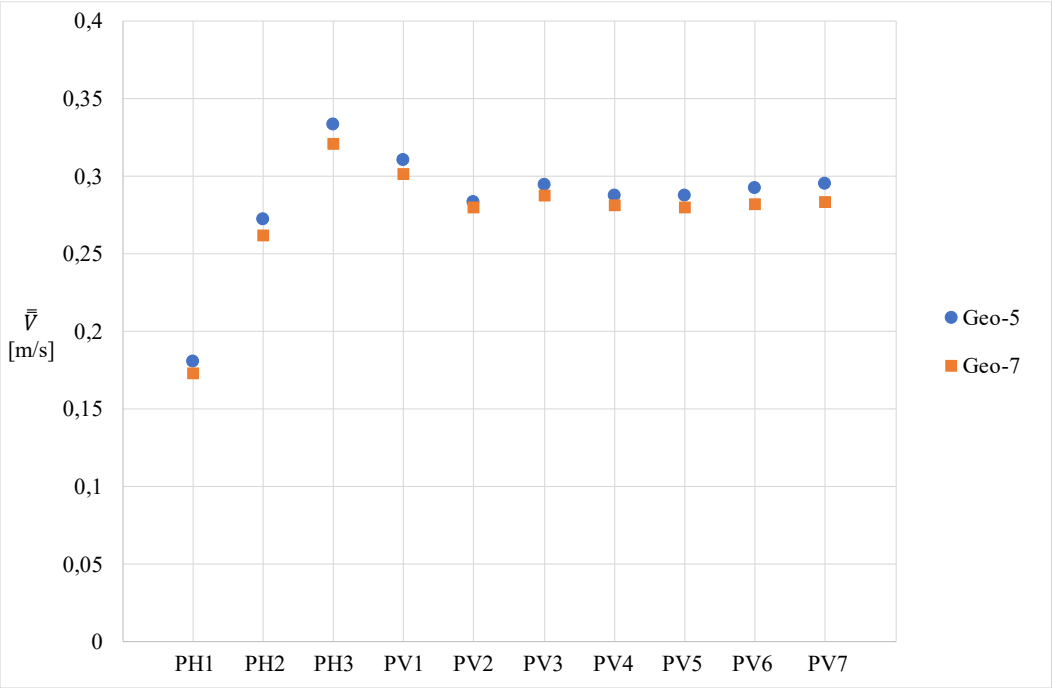


Figura A-13 – Velocidade média em função do número de pás.

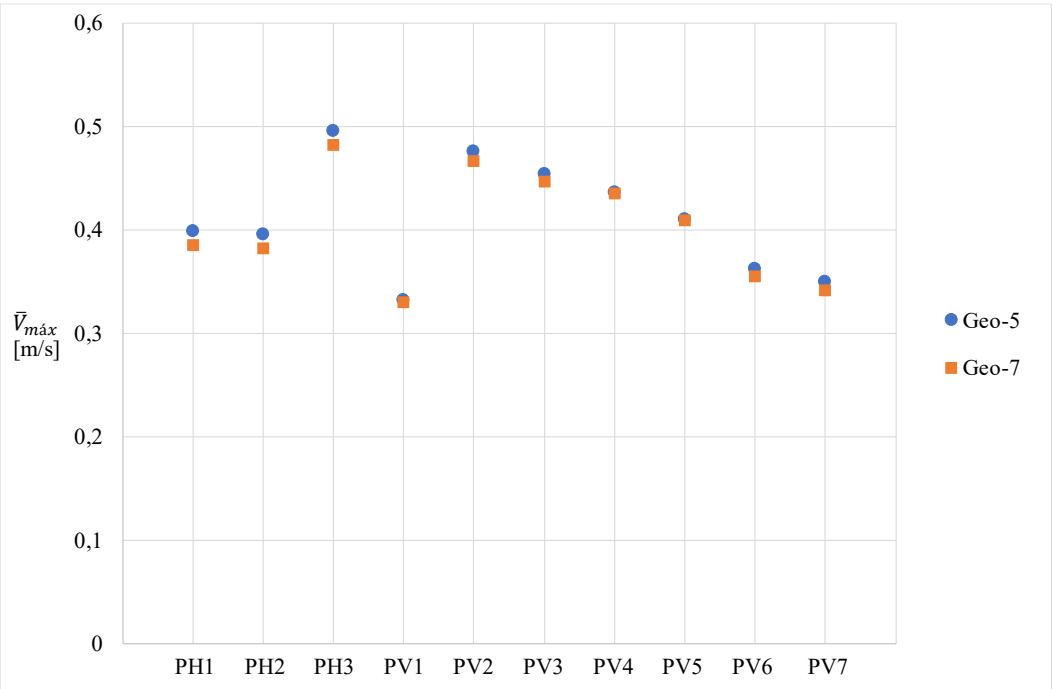


Figura A-14 – Velocidade máxima em função do número de pás.

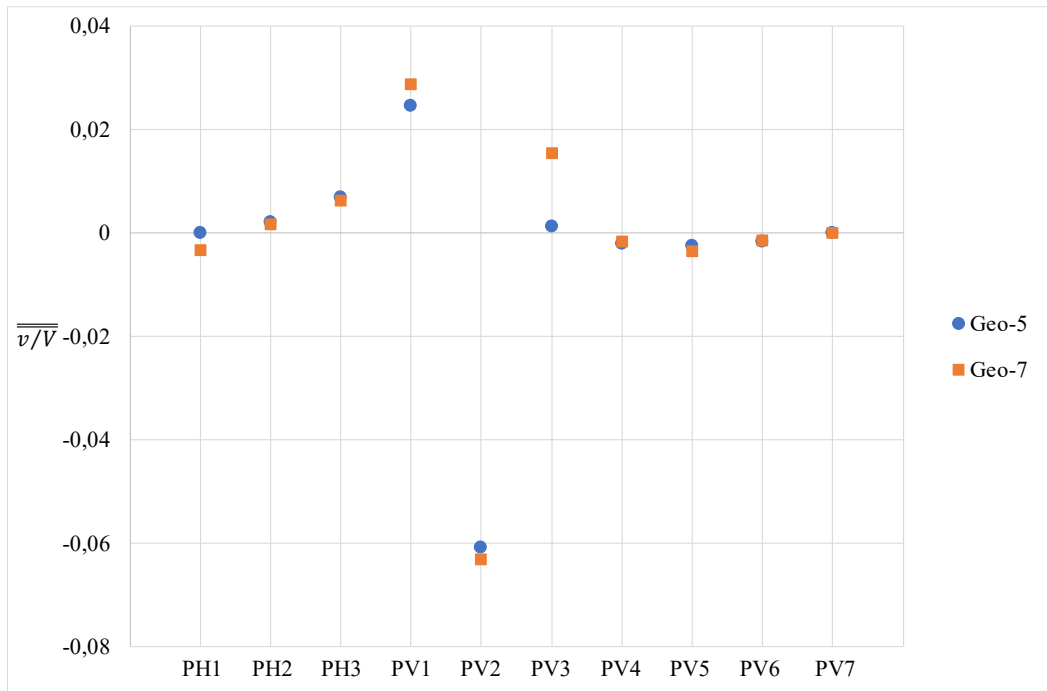


Figura A-15 – Mistura vertical em função do número de pás.

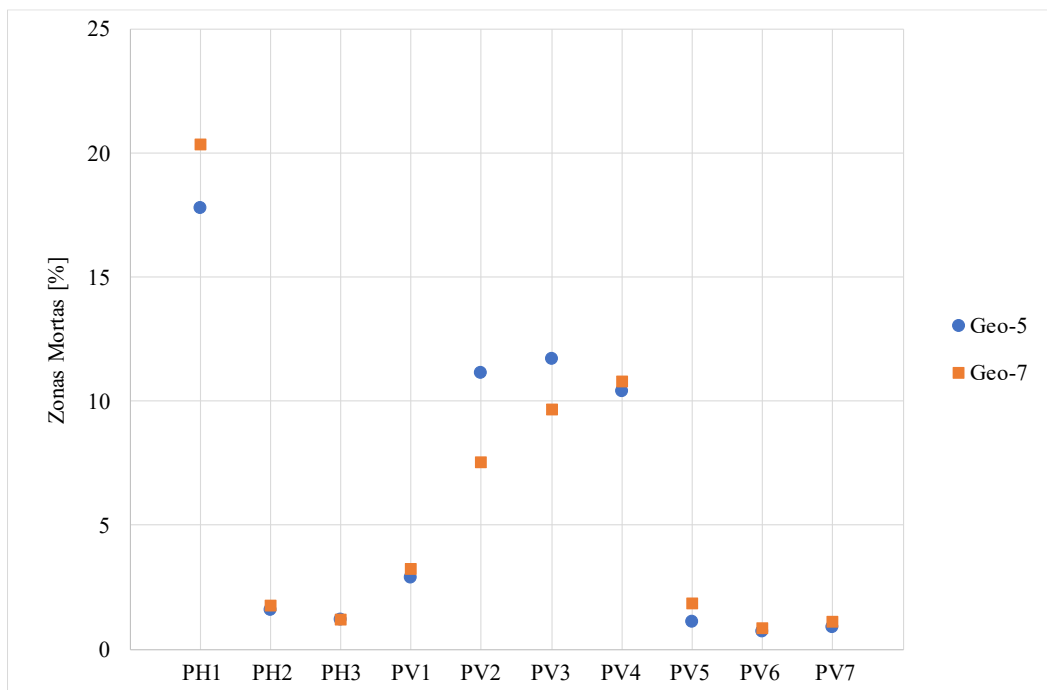


Figura A-16 – Zonas mortas em função do número de pás.

## Anexo B Gráficos comparativos entre malhas

Neste anexo, apresentam-se os gráficos que evidenciam as diferenças entre as soluções obtidas nas duas malhas computacionais, conforme discutido na secção 3.3. A análise é separada por indicadores e apresenta-se um gráfico para a Geo-2 e outro para a Geo-3. Desta forma, é possível aferir se existe correlação nos resultados. A primeira e segunda versões são identificadas, respetivamente, pelos sufixos “V1” e “V2”.

### Velocidade média

A velocidade média no plano PH1 diminui significativamente, porque, na V1, existia um erro grande de interpolação, atribuindo-lhe o mesmo valor do PH2. Tem-se um pequeno aumento no PH2 e manutenção no PH3. Nos planos verticais, há pequenas alterações nos PV1 e PV2. Existe boa correlação entre a Geo-2 (Figura B-1) e a Geo-3 (Figura B-2).

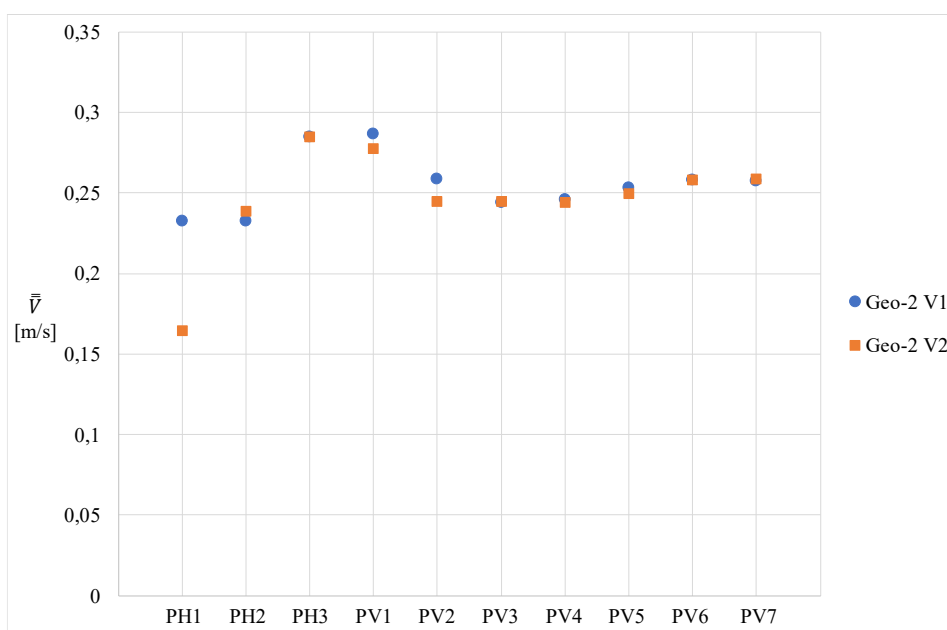


Figura B-1 – Velocidade média na Geo-2, nas duas versões da malha.

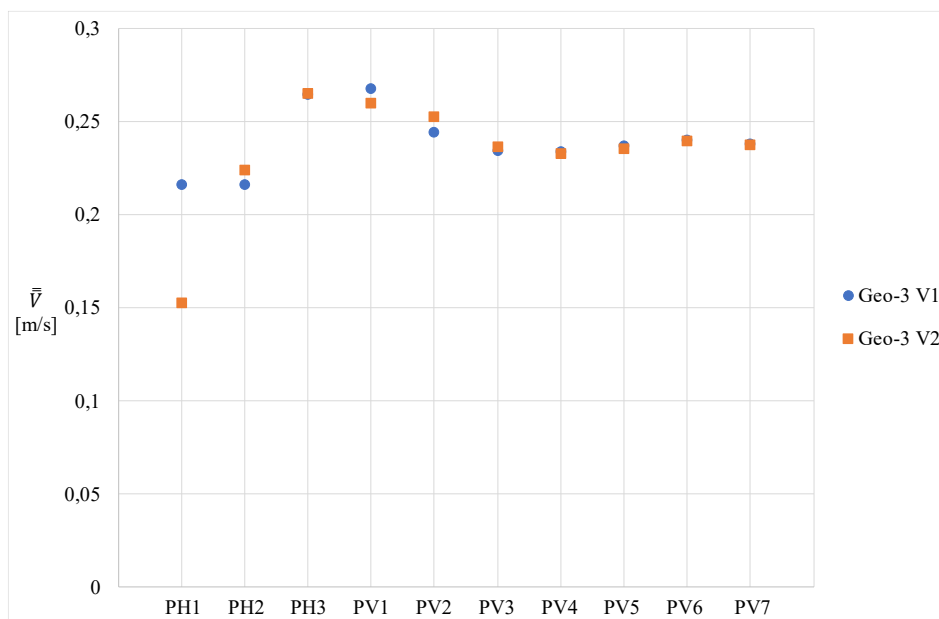


Figura B-2 – Velocidade média na Geo-3, nas duas versões da malha.

## Velocidade máxima

A velocidade máxima aumentou em todos os planos horizontais e nos PV2, PV3 e PV4, diminuiu no PV1 e houve uma manutenção do valor nos restantes planos verticais. Existe boa correlação entre os gráficos da Geo-2 (Figura B-3) e Geo-3 (Figura B-4).

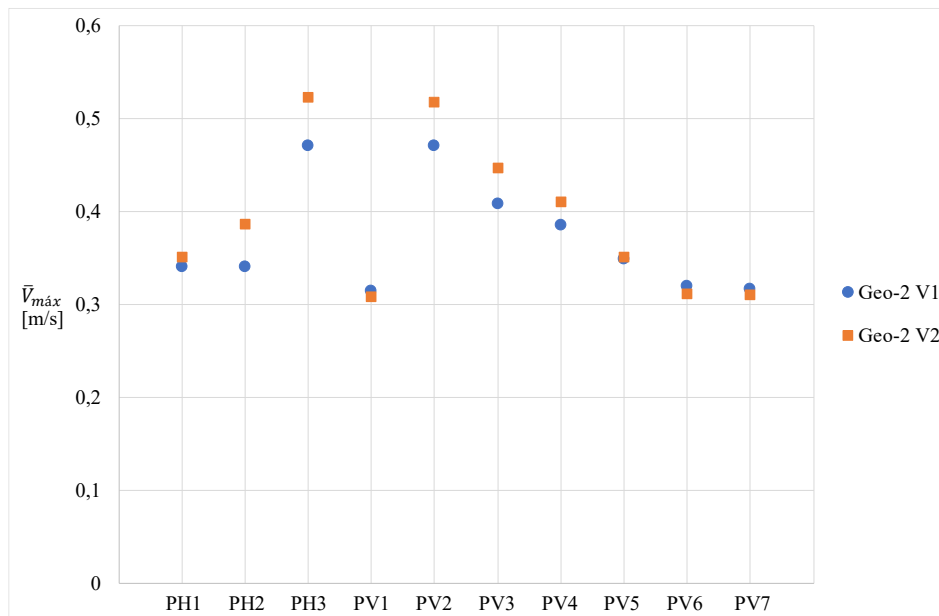


Figura B-3 – Velocidade máxima na Geo-2, nas duas versões da malha.

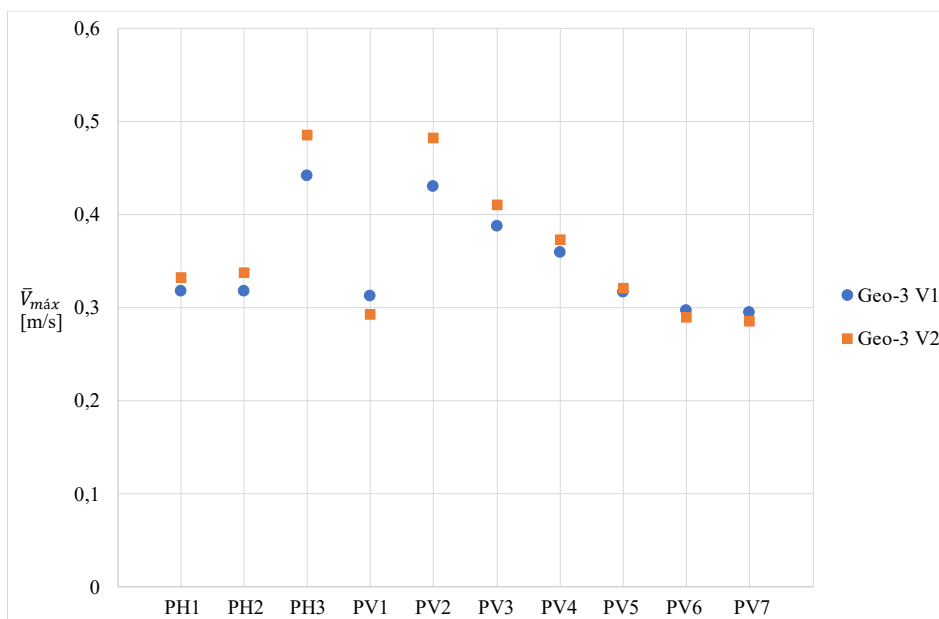


Figura B-4 – Velocidade máxima na Geo-3, nas duas versões da malha.

## Mistura vertical

Ao transitar da V1 para a V2, tem-se uma redução no PH1, mantendo-se o sentido do escoamento na Geo-2 (Figura B-5), mas na Geo-3 (Figura B-6) dá-se uma inversão. Nos PH2 e PH3, os valores mantêm-se nos dois casos. No PV1 da Geo-2 há um aumento significativo, mas existe uma diminuição de magnitude semelhante na Geo-3. No PV2, há uma mudança de valor e inversão de sinal nos dois casos: na Geo-2 passa de negativo a positivo, enquanto na Geo-3 transita de positivo a negativo. No PV3 repete-se o fenómeno do plano anterior, mas

agora passam as duas geometrias de negativo a positivo. No PV4 e seguintes, a mistura vertical diminui ou mantém-se. Tendo em conta a disparidade entre as geometrias, não há correlação neste indicador.

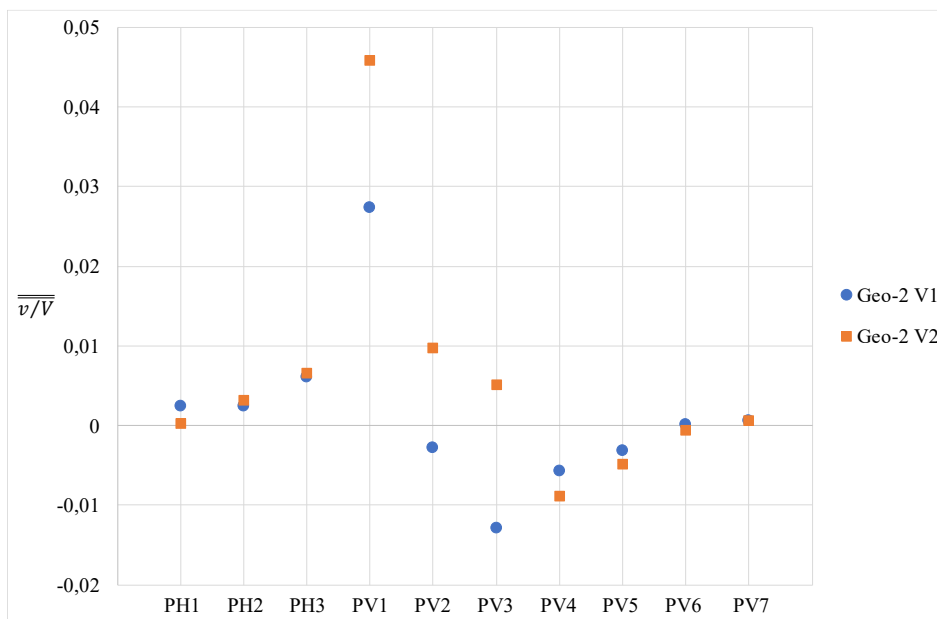


Figura B-5 – Mistura vertical na Geo-2, nas duas versões da malha.

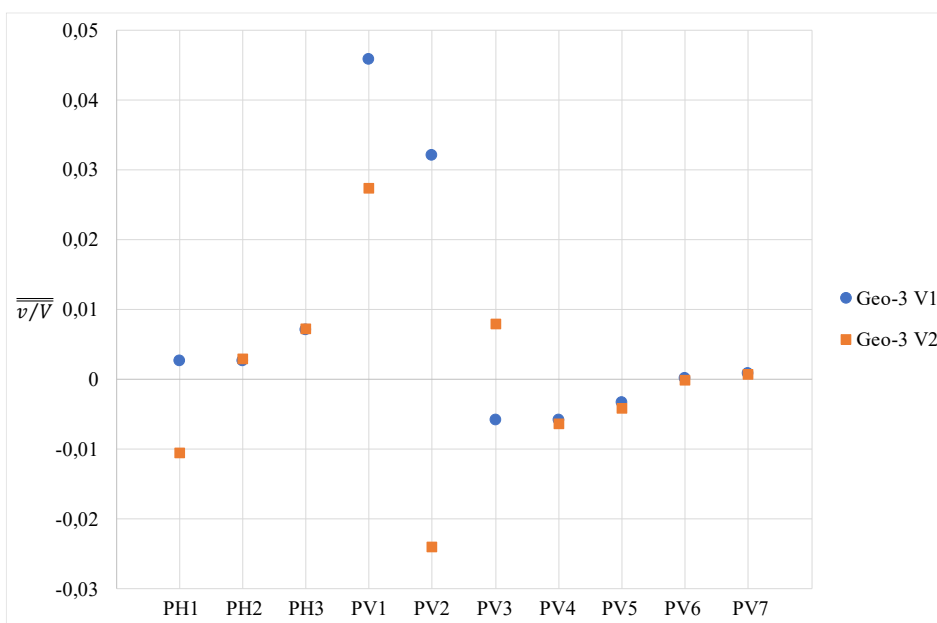


Figura B-6 – Mistura vertical na Geo-3, nas duas versões da malha.

## Zonas mortas

Em conformidade com o comportamento da velocidade média nos planos horizontais, tem-se uma diminuição no PH1 e a manutenção nos outros dois planos. No PV1 mantém-se o valor, no PV2 aumenta e no PV3 diminui. A Geo-2 (Figura B-7) tem um aumento no PV4, enquanto a Geo-3 (Figura B-8) beneficia de uma diminuição. Nos últimos três planos verticais há pequenas diminuições nos dois casos. Existe boa correlação, exceto no PV4.

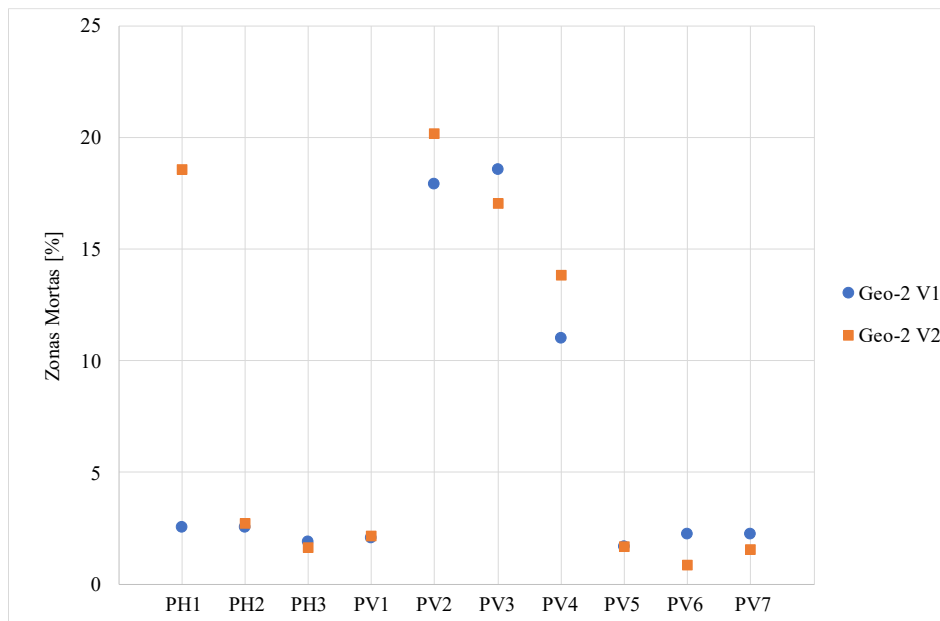


Figura B-7 – Zonas mortas na Geo-2, nas duas versões da malha.

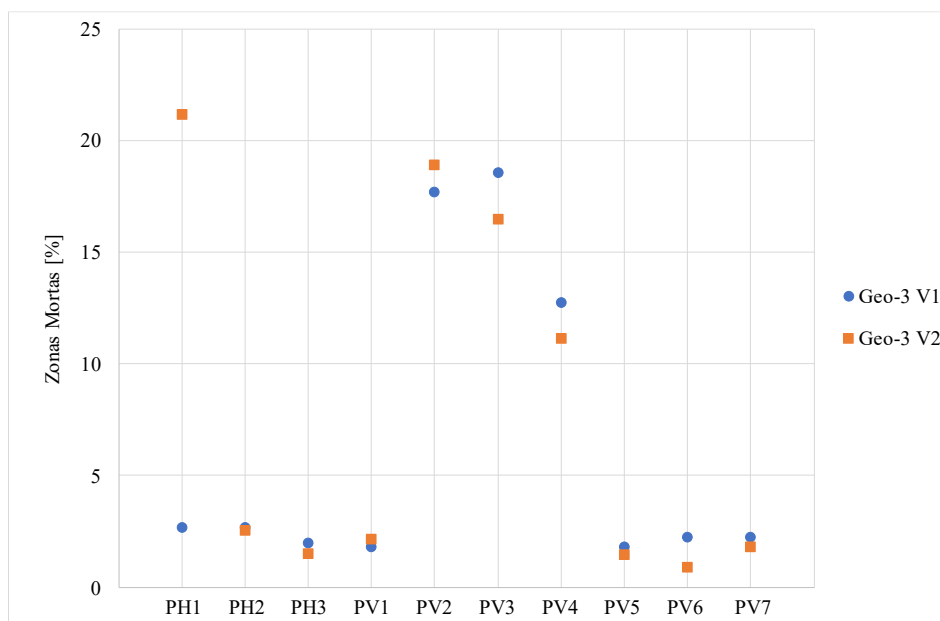


Figura B-8 – Zonas mortas na Geo-3, nas duas versões da malha.